

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Univerzitní studijní programy

Měření frekvenční charakteristik MEMS
akcelerometru a gyroskopů.

Frequency Characteristics Measurement of MEMS
Accelerometers and Gyroscopes.

Student: Jiří Metlík

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student:

Jiří Metlík

Studijní program:

B3943 Mechatronika

Studijní obor:

3906R007 Automobilová elektronika

Téma:

Měření frekvenčních charakteristik MEMS akcelerometrů a gyroskopů
Frequency Characteristics Measurement of MEMS Accelerometers and Gyroscopes

Zásady pro vypracování:

1. Popište vlastnosti a možnosti využití MEMS akcelerometrů a gyroskopů.
2. Seznamte se s programovým prostředím LabView, popište jeho základní vlastnosti a využití pro měření základních charakteristik snímačů.
3. Navrhněte a realizujte experimentální úlohu pro měření frekvenčních charakteristik MEMS snímačů.
4. Vyhodnoťte změřené frekvenční charakteristiky.
5. Dosažené výsledky kriticky zhodnoťte a navrhněte další směr řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

JURÁNEK, M., KULHÁNEK, J. The use of MEMs accelerometers for measurement of driver seat comfort. In Proceedings of International Carpathian Control Conference '2011, Velké Karlovice, Czech Republic, May 25-28, 2011. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2011, 176-179. ISBN 978-1-61284-359-9
KLEČKA, R., TŮMA, J., MAHDAL, M. Analýza měření s vibrátorem TIRA. In XXXIV. Semináry ASR' 09 "Instruments and Control", Ostrava, 24.4.2009. Ostrava : VŠB TU Ostrava, 2009, p. 115-124. Dostupný z WWW: <<http://www.fs.vsb.cz/akce/2009/asr2009/>>. ISBN 978-80-248-19.
PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F. & HALAJ, M. Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. AUTOMA. 7-8/2001, ročník VII, s. 50 - 54. ISSN 1210-9592.
TŮMA, J. Diagnostika strojů, 1. vyd. Ostrava : Skripta VŠB - TU Ostrava, 2009. 138 s. ISBN 978-80-248-2116-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



prof. Ing. Jiří Tůma, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Petr Noskiewicz, CSc.
prorektor pro studium

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21.5. 2012

.....*medlík Jiří*.....
podpis

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21.5. 2012

.....*metlík Jiří*.....

Podpis

Jiří Metlík

Libina, 764

Anotace bakalářské práce

Metlík, J. *Měření frekvenčních charakteristik MEMS akcelerometrů a gyroskopů*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Univerzitní studijní programy, 2012, 63 s. Vedoucí práce: Wagnerová, R.

Bakalářská práce se zabývá měřením frekvenčních charakteristik MEMS snímačů (akcelerometry, gyroskopy). Úvodní část práce popisuje frekvenční charakteristiky a postup jejich měření. V další části jsou popsány základní vlastnosti MEMS systémů, jejich zapojení a využití. Akcelerometry se využívají jako senzory pro měření rozdílu mezi kinematickým zrychlením a gravitačním zrychlením. Gyroskopy se využívají k určení polohy a otřesů snímače. Poslední část popisuje základní vlastnosti programu LabView, pomocí kterého se budou provádět měření frekvenčních charakteristik. Byl navržen měřicí řetězec pro realizování měření frekvenční charakteristik. Na konkrétních příkladech bude ukázáno postup měření a vyhodnocení.

Klíčová slova:

Frekvenční charakteristiky, MEMS, Akcelerometr, Gyroskop, LabView, Signal Analyser

Anotation of Bachelor Thesis

Metlík, J. *Frequency Characteristics Measurement of MEMS Accelerometers and Gyroscopes* : Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University Ostrava, University study programmes, 2012, 63 p. Thesis head: Wagnerová, R.

This thesis deals with measuring frequency characteristics of MEMS sensors (accelerometers, gyroscopes). The introduction part describes three types of frequency responses and their measurement. Then there is shown basic properties of MEMS systems. Accelerometer is sensor which measures difference between kinematic acceleration and gravity acceleration. Gyroscope is used for determination of position and shocks of sensor. Last part is dedicated to software Labview and its use for measuring frequency responses. The measuring task for realization of frequency characteristics measuring was designed. Procedure of measuring and evaluation will be represented by specific examples.

Key words:

Frequency characteristics, MEMS, Accelerometer, Gyroscope, LabView, Signal Analyser

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK.....	7
1 Úvod	10
2 Frekvenční charakteristiky a jejich měření	11
2.1 Určení frekvenčních charakteristik	11
2.2 Zobrazení frekvenčních charakteristik	13
2.2.1 Frekvenční charakteristiky v komplexní rovině (Amplitudo-fázová frekvenční charakteristika)	13
2.2.2 Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích.....	13
2.3 Měření frekvenčních charakteristik	14
3 Snímače	16
3.1 MEMS	17
3.1.1 Technologie MEMS	17
3.2 Akcelerometry.....	17
3.2.1 Způsob vyhodnocení zrychlení.....	17
3.2.2 Základní dělení akcelerometrů a typy akcelerometrů pro měření	18
3.3 Gyroskopy	21
3.3.1 Matematický popis.....	22
3.3.2 Gyroskopy v integrovaném provedení MEMS	23
3.3.3 Použití, dělení a typ gyroskopu pro měření	25
4 LabVIEW.....	28
4.1 Příklady aplikace v LabVIEW.....	30
4.1.1 Experimentální USB karta Velleman K8055	30
4.1.2 Multifunkční karta NI USB-6008/6009	33
5 Návrh měřicího řetězce.....	39
6 Měření a vyhodnocení frekvenčních charakteristik	46
7 Závěr.....	58
Použitá literatura	61

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

Proměnná	Jednotka	Název proměnné
$A_1, A_2, A(k)$	[V]	amplituda
$A(\omega)$	[-]	modul frekvenčního přenosu
$\mathbf{F} F_C$	[N]	vektor síly
F_C	[N]	virtuální síla (celková síla)
$G(s)$	$[\text{m} \cdot \text{N}^{-1}]$	obrazový přenos
$G(j\omega), G(k)$	$[\text{m} \cdot \text{N}^{-1}]$	frekvenční přenos
$G(\text{dB})$	[dB]	modul přenosu v decibelech
$H1(k), H2(k)$	[-]	výpočet přenosu v FFT analyzátorech
$H3(k)$	[-]	geometrický průměr vypočtených charakteristik
I, I_0	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	celkový moment setrvačnosti, momenty setrvačnosti
J	[-]	délka záznamu
L	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	moment hybnosti
L-obraz	[-]	Laplaceův obraz
M	[kg]	hmotnost rotujícího tělesa
N	$[\text{N} \cdot \text{m}]$	moment síly
O	[-]	pořadí měření (chyba)
R	[m]	vzdálenost hmoty od osy
T	[s]	perioda
$U(s)$	[-]	L-obraz vstupní proměnné
$X(k)$	[-]	vstupní signál
$Y(k)$	[-]	výstupní signál
$Y(s)$	[-]	L-obraz výstupní proměnné
a	[mm]	vzdálenost osy rotace od osy procházejícím těžištěm
a_n, b_n	[-]	koefficienty vstupních a výstupních lineární diferenciální rovnic
f	[Hz]	frekvence
g	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$	gravitační zrychlení
$j = \sqrt{-1}$	[-]	imaginární jednotka
k	[-]	pořadnice vzorku
m	[kg]	hmotnost
o	[-]	index pořadí měření

\mathbf{p}	$[\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	vektor hybnosti
\mathbf{r}	$[\text{m}]$	polohový vektor
t	$[\text{s}]$	čas
$u(t)$	$[-]$	originál vstupní proměnné
$u(0)$	$[-]$	počáteční hodnota vstupní proměnné
v	$[\text{km}\cdot\text{s}^{-1}]$	rychlost
$y(t)$	$[-]$	originál výstupní proměnné
$y(0)$	$[-]$	počáteční hodnota výstupní proměnné
α, β	$[\circ]$	fázový posun
$\varphi(\omega), \varphi(k)$	$[\circ]$	fáze frekvenčního přenosu
ω	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	úhlová frekvence
Δt	$[\text{s}]$	přírůstek času
AFCH	$[-]$	Amplitudová frekvenční charakteristika
AFFCH	$[-]$	Amplitudo-fázová frekvenční charakteristika
A/D převodník	$[-]$	Analogově/digitální převodník
DAQ	$[-]$	Data Acquisition (sběr dat)
DC	$[-]$	Direct Current (stejnoseměrný proud)
EMI	$[-]$	Electromagnetic Interference (Elektromagnetické rušení)
FFCH	$[-]$	Fázová frekvenční charakteristika
FFT	$[-]$	Fast Fourier Transform (Rychlá Fourierova transformace)
FCH	$[-]$	Frekvenční charakteristika
FRF	$[-]$	Frequency Response Function (Frekvenční přenos)
GPS	$[-]$	Global Positioning System (Globální družicový polohový systém)
LabView	$[-]$	Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench (laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů)
LFCH	$[-]$	Logaritmické frekvenční charakteristiky
MAX	$[-]$	Measurement & Automation Explorer (Průzkumník měření a automatizace)
MCU	$[-]$	mikrokontrolér

MEMS	[-]	Micro-Electro-Mechanical-Systems (mikro-elektronicko mechanický systém)
NI	[-]	National Instrument (firma)
RFI	[-]	Radio Frequency Interference (Vysokofrekvenční rušení)
RoHS	[-]	Restriction of Hazardous Substances (omezení nebezpečných látek)
SMD	[-]	Surface Mount Device (Součástky pro povrchovou montáž)
SPI	[-]	Serial Peripheral Interface (sériové periferní rozhraní)
USB	[-]	Universal Serial Bus (Univerzální sériová sběrnice)
VI	[-]	Virtual instrument (Virtuální přístroj)

1 Úvod

V dnešní době se snímače vyskytují v průmyslových zařízeních. Zobrazení průběhů charakteristik snímačů je vyobrazeno pomocí frekvenčních charakteristik. Můžeme určit, o jaký systém se jedná, podle toho můžeme zvolit typ regulátoru pro řízení. Zobrazení frekvenčních charakteristik můžeme vykreslit pomocí amplitudo-fázové frekvenční charakteristiky a logaritmické frekvenční charakteristiky. Zhodnocení těchto charakteristik nám pomůže k lepšímu výběru regulátoru.

Pro měření fyzikálních veličin se používají MEMS systémy, výhodou MEMS systému je, že jsou vyráběny v integrovaném provedení. Dnešní MEMS systémy se mohou využívat u některých akcelerometrů a gyroskopů. Pomocí gyroskopu určíme úhlovou rychlost. Akcelerometry jsou typem snímače zrychlení. Akcelerometr se většinou vyhodnocuje rozdíl mezi kinetickým a gravitačním zrychlením. S akcelerometry se můžeme setkat v automatizační technice. Gyroskopy pracují na principu rotačního setrvačníku, kde je gyroskop uchycený ve třech osách. Nastavení polohy se provádí nastavením všech tří os. S tímto přístrojem se můžeme setkat, jak ve strojírenském průmyslu, tak v elektronickém průmyslu.

Dalším cílem bakalářské práce je navržení aplikace v programu LabVIEW. Program je vyvinutý společností National Instrument, tento software slouží pro měření fyzikálních veličin. Tento program realizuje měřicí přístroj a následně realizuje v praktickém provedení. Program LabVIEW můžeme použít ve spolupráci s některými přístroji, která vyvinula společnost National Instrument. Popíšeme použité prvky softwaru, jejich parametry a vlastnosti pro monitorování a řízení procesů.

Aplikace programu, kterou se tato práce zabývá, je návrh měření frekvenčních charakteristik akcelerometrů. Návrh aplikace pro měření je stejně realizován jako návrh měřicího řetězce.

Pro měření akcelerometru byl zvolen program LabVIEW od společnosti National Instrument. V tomto programu byl navržen program pro měření jednotlivých kanálů. Tyto kanály jsou následně převedeny do funkčního bloku, kde provádí jednotlivé výpočty, které jsou potom následně zobrazeny v grafech. Podle jednotlivých průběhů se provede vyhodnocení jednotlivých charakteristik.

2 Frekvenční charakteristiky a jejich měření

V této kapitole bude popsáno matematické určení frekvenčních charakteristik (FCH) a jeho vyhodnocení.

2.1 Určení frekvenčních charakteristik

FCH se vyskytují v automatickém řízení. Z elektronických obvodů můžeme určit pomocí matematických úprav, jak se může chovat obvod na výstupu. Podle výstupu určíme, jestli se jedná o stabilní nebo nestabilní systém. FCH popisuje frekvenční přenos systému $G(j\omega)$, kde dáváme přednost úhlové frekvence $\omega(\text{s}^{-1})$ před kmitočtem $f(\text{Hz})$. Vykreslením FCH se vykreslí amplituda a fáze v závislosti na úhlové frekvenci ω . Tyto charakteristiky, se používají v generátorech a dvoukanálových osciloskopech. Dalším způsobem využití FCH je návrh filtrů, které slouží k odstranění šumů.

Určení frekvenčního přenosu

Frekvenční přenos je závislost, která popisuje chování elektrického obvodu. Určení přenosu se provádí poměrem obrazu výstupní veličiny k obrazu vstupní veličiny při nulových počátečních podmínkách. Nesmíme zapomenout, že se jedná o popis v oblasti komplexní proměnné (frekvence ω).

Obecný postup určení obrazového přenosu a posléze frekvenčního přenosu je ukázán níže. Obecně vlastnosti systému lze popsat pomocí lineární diferenciální rovnice s konstantními koeficienty:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t), \quad (2.1)$$

s počátečními podmínkami

$$y(0), \frac{dy(0)}{dt}, \dots, \frac{d^{n-1} y(0)}{dt^{n-1}}, \quad (2.2)$$

$$u(0), \frac{du(0)}{dt}, \dots, \frac{d^{m-1} u(0)}{dt^{m-1}}, \quad (2.3)$$

kde a_n, b_n - koeficienty lineárních diferenciálních rovnic, $u(t), y(t)$ - originál vstupní a výstupní proměnné, $u(0), y(0)$ - počáteční hodnoty vstupní a výstupní proměnné.

Upravíme lineární diferenciální rovnici na obraz

$$a_n s^n Y(s) + \dots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_m s^m U(s) + \dots + b_1 s U(s) + b_0 U(s), \quad (2.4)$$

kde $Y(s)$ – L -obraz výstupní proměnné (Laplaceův obraz), $U(s)$ – L - obraz vstupní proměnné.

Podíl obrazu výstupní ku vstupní proměnné je přenos $G(s)$,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0}, \quad (2.5)$$

kde $G(s)$ - obrazový přenos.

Frekvenční přenos určíme tak, že do obrazového přenosu zavedeme substituci $s=j\omega$.

$$G(j\omega) = \frac{b_m (j\omega)^m + \dots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + \dots + a_1 (j\omega) + a_0}, \quad (2.6)$$

kde ω - úhlový kmitočet [rad s^{-1}], $j = \sqrt{-1}$ - imaginární jednotka

Úhlový kmitočet můžeme vypočítat pomocí frekvence f [Hz] nebo periody T [s],

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (2.7)$$

Frekvenční přenos je funkcí komplexní proměnné, a proto ho lze rozdělit na reálnou a imaginární část.

$$G(j\omega) = \text{Re}\{G(j\omega)\} + j \text{Im}\{G(j\omega)\} = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \quad (2.8)$$

kde

$$A(\omega) = \sqrt{[\text{Re}\{G(j\omega)\}]^2 + [\text{Im}\{G(j\omega)\}]^2}, \quad (2.9)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}\{G(j\omega)\}}{\text{Re}\{G(j\omega)\}}, \quad (2.10)$$

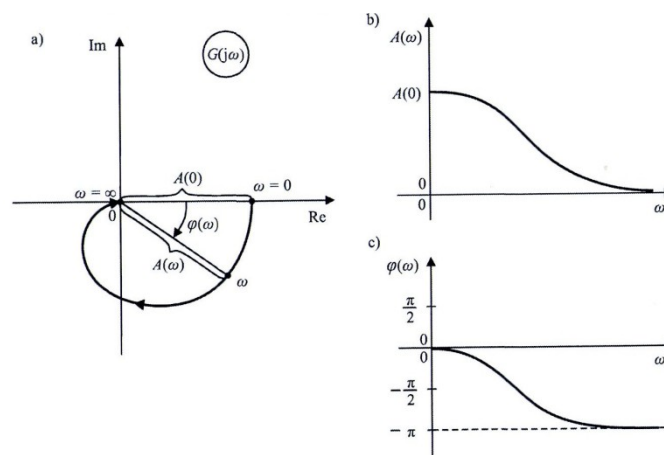
$A(\omega)$ - modul frekvenčního přenosu, $\varphi(\omega)$ - fáze frekvenčního přenosu

2.2 Zobrazení frekvenčních charakteristik

FCH můžeme vykreslit dvěma způsoby, které jsou popsány v následujících bodech.

2.2.1 Frekvenční charakteristiky v komplexní rovině (Amplitudo-fázová frekvenční charakteristika)

Výhodou amplitudo-fázové frekvenční charakteristiky (AFFCH) je její názornost. Podle jejího průběhu dokážeme rychle a snadno určit charakter dynamického členu. Velikou nevýhodou je, že nelze odečíst ω . Na obr. 2.1 jsou vidět amplitudová a fázová FCH což je druhá možnost vykreslení frekvenční charakteristiky. Vykreslení obou frekvenčních charakteristik musíme znát.



Obr. 2.1 Frekvenční charakteristiky a) amplitudo-fázová, b) amplitudová, c) fázová
[VÍTEČEK A. & VÍTEČKOVÁ M. 2008]

Z obr. 2.1 a) je zobrazena AFFCH. Amplitudu přenosu znázorňuje délka vektoru. Úhel, který svírá mezi vektor s kladnou reálnou osou, je fázový posun mezi vstupním a výstupním signálem při dané frekvenci, b) a c) je zobrazena amplitudová frekvenční charakteristika (AFCH) a fázová frekvenční charakteristika (FFCH), podle těchto charakteristik můžeme snadno vyčíst jeho velikost amplitudy a fázi závislou na kmitočtu.

2.2.2 Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích

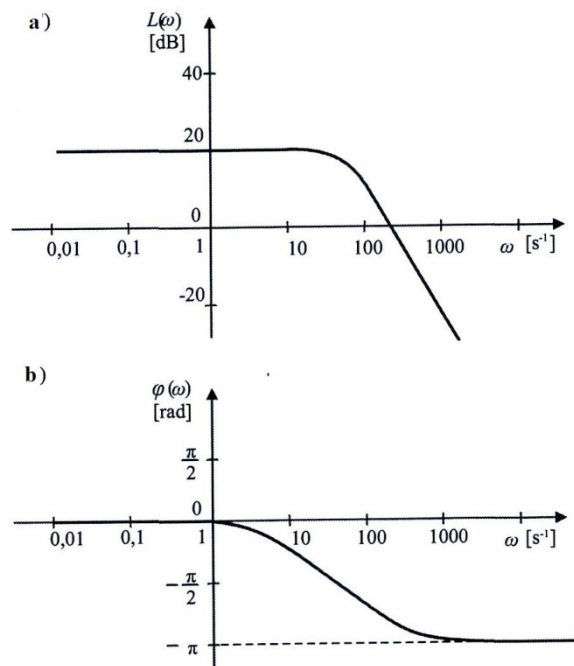
Tyto charakteristiky se používají v nízkofrekvenční technice. FCH lze vykreslit v logaritmických souřadnicích.

$$G_{dB} = 20 \log |G(j\omega)| \quad (2.11)$$

kde G_{dB} - modul přenosu v decibelech

Výhodou logaritmických frekvenčních charakteristik (LFCH) je snadné a přesné čtení úhlové frekvence než u FCH.

Na obr. 2.2 můžeme vidět příklad LFCH.



Obr. 2.2 Frekvenční charakteristiky: a) logaritmická amplitudová, b) logaritmická fázová
[VÍTEČEK A. & VÍTEČKOVÁ M. 2008]

2.3 Měření frekvenčních charakteristik

Uvážíme-li, že se jedná o dynamický systém, přivedeme na vstup harmonického signálu

$$u(t) = A_1 \sin(\omega t). \quad (2.12)$$

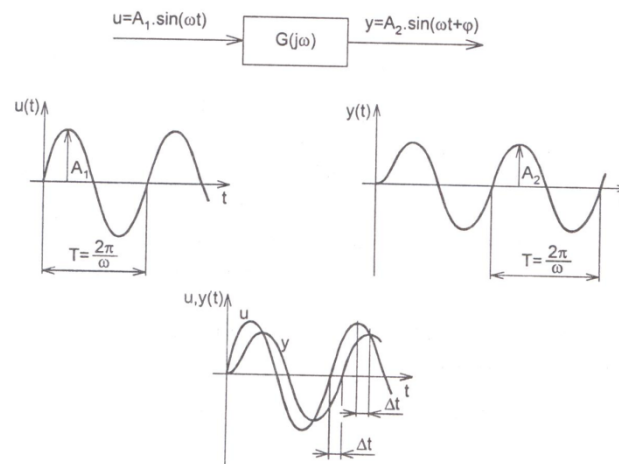
kde A_1 - amplituda vstupního signálu, t - čas

Na výstupu bude také harmonický signál s tím rozdílem, že se změní amplituda a dojde k fázovému posunu,

$$y(t) = A_2 \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.13)$$

kde A_2 - amplituda výstupního signálu.

Na obr. 2.3 je zobrazen průběh harmonického signálu lineárních dynamickým systémem.



Obr. 2.3 Průběh harmonického signálu lineárním dynamickým systémem [NOSKIEVIČ P. 1999]

Po ustálení výstupní charakteristiky si můžeme odečíst hodnotu amplitudy A_2 a z časového průběhu si odečíst časový posuv výstupního signálu vůči vstupnímu signálu. Ze stejného signálu můžeme považovat stejné maximální, minimální hodnoty a průchod signálu nulou. Jestliže fázový posun bude roven nule. Dostali bychom se těmto událostem ve stejném okamžiku. Reálné dynamické vlastnosti při setrvačnosti systému, způsobí časové zpoždění výstupního signálu vzhledem ke vstupnímu signálu. Porovnáním výstupního a vstupního signálů můžeme vyhodnotit úhlovou frekvenci vstupního signálu jedním bodem FCH.

Poměrem amplitud získáme hodnotu zesílení

$$A(\omega) = |G(j\omega)| = \frac{A_2}{A_1}, \quad (2.14)$$

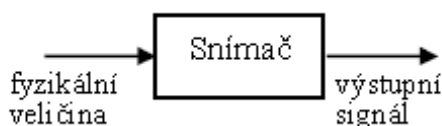
z časového přírůstku Δt vyhodnotíme fázový posun $\varphi(\omega)$

$$\varphi(\omega) = \omega \Delta t = \frac{2\pi}{T} \Delta t. \quad (2.15)$$

[ANDRÝSEK, F., BRÝDL, Z., KOHOUT, L., ŠMEJKAL, L. & VORÁČEK, R. 2005]

3 Snímače

Snímač je technické zařízení určeno pro snímání a detekování fyzikálních veličin. Používají se v regulačních obvodech jako členy pro získávání informací, kde na vstup přivádíme fyzikální veličinu a na výstupu ze snímače je často elektronický signál. Vyhodnocení signálu určeno snímačem, který snímá signál.



Obr. 3.1 Teoretické zobrazení snímače

Rozdělujeme snímače podle těchto kritérií:

- podle měřené veličiny – snímače polohy, rychlosti, zrychlení, kmitavého pohybu,
- podle princip činnosti – snímače mechanické, odporové, kapacitní, indukční, magnetické, optické, ultrazvukové, pneumatické,
- podle průběhu výstupního signálu – snímače spojitě a nespojitě.

Snímače polohy můžeme realizovat na principu indukčním, kapacitním nebo magnetickém principu. Ve vibrodiagnostice se využívají snímače na principu indukčním, protože využívají závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Ty jsou způsobeny vysokofrekvenčním magnetickým polem v elektrickém vodivém materiálu. Nevýhodou vysokofrekvenčního magnetického pole je, že jsou náchylné na parazitní vlivy. Parazitní vlivy jsou způsobeny délkou vedení měřeného obvodu a vnějšího elektromagnetického pole, proto se vyrábějí v integrované podobě.

Snímače rychlosti pro kmitání, můžeme použít i snímač zrychlení. Princip elektrodynamického snímače je, že měřicí cívka se pohybuje v magnetickém poli permanentního magnetu. V cívce při kmitání pohybu se indukuje napětí a to z měřeného objektu na pouzdro snímače.

3.1 MEMS

MEMS (mikro-elektronicko-mechanické systémy) systémy jsou integrací mechanických prvků, senzorů, akčních členů, řídicí a vyhodnocovací elektroniky.

3.1.1 Technologie MEMS

Technologie MEMS systému je složité zařízení z hlediska umístění elektronických i mikro-mechanických prvků, které jsou založeny na polovodičovém křemíku nebo germaniu. Pomocí moderních výrobních metod se systémy MEMS vyrábějí ve formě integrovaných obvodů. Jedná se převážně o pohybové senzory (akcelerometry, gyroskopy,...). Využívají se k vytváření malých struktur řádově mikrometrů. Většina metod je převzata nebo upravena z výroby integrovaných obvodů. S MEMS technologií se můžeme setkat v provedení obvodů SMD (Surface Mount Device – Součástky pro povrchovou montáž).

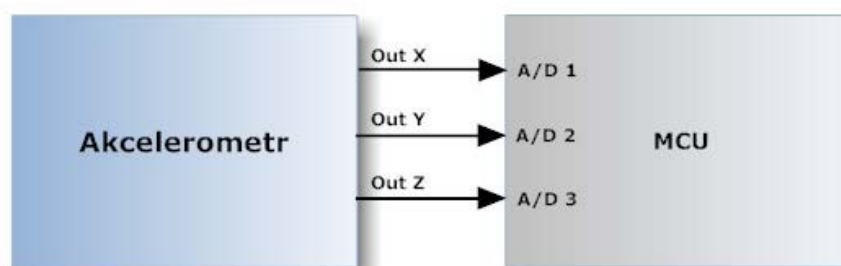
3.2 Akcelerometry

Akcelerometry je typ senzorů využívající setrvačnosti hmot. Slouží pro měření rozdílu mezi kinetickým zrychlením a gravitačním zrychlením. Při vylepšení starých akcelerometrů se vlastnosti senzorů snižuje spotřeba, velikost a cena. Vychází ze vztahu mezi velikostí síly a velikostí hmoty. Využívají fyzikální jevy, pomocí nich získává elektrický signál. Při měření můžeme nalézt chybu v převodu mezi veličinami, tím klesá schopnost vyhodnocení přesné hodnoty senzoru.

Akcelerometry se využívají v moderní elektronice, jako je například pro detekci orientace a vibrací. Příkladem jsou snímače zrychlení pro rozjezd automobilu.

3.2.1 Způsob vyhodnocení zrychlení

Na obr. 3.2 je vidět propojení akcelerometru s mikrokontrolérem.



Obr. 3.2 Příklad připojení akcelerometru [CHMELÁŘ, P. 2011]

Výstupní signály z akcelerometru jsou přivedeny na vstupy A/D převodníku, který je součástí mikrokontroléru (MCU). Mikrokontrolér má v sobě jádro mikroprocesoru s pamětmi, je schopen samostatné funkce bez přidané periferie. Napěťové úrovně výstupu z akcelerometru a vstupu do MCU musí být pro správnou funkci stejné. Podle počtu bitů A/D převodníku (analogově/digitální převodník) můžeme určit, s jakou úrovní napětí se vyskytují výstupy akcelerometru. Citlivost určíme po přepočtu maximální velikosti zrychlení, které je schopen akcelerometr dosáhnout, tomu odpovídá maximální hodnota výstupního napětí na jednotlivý bit. Pro zápornou hodnotu zrychlení je napěťová hodnota při výstupní úrovni nulová.

3.2.2 Základní dělení akcelerometrů a typy akcelerometrů pro měření

Akcelerometry lze z hlediska měření rozdělit do těchto typů.

Síla nebo napětí	-piezoelektrický akcelerometr
	-piezorezistivní akcelerometry
	-rezonátory
Posunutí	-potenciometrický akcelerometr
	-kapacitní akcelerometr
	-induktivní akcelerometr
	-optický akcelerometr

[CHMELÁŘ P. 2011]

Nejpoužívanějším typem akcelerometru pro měření vibrací v automobilovém průmyslu je Delta Tron akcelerometry od Brüel&Kjær (4507B a 4508B).

Vlastností použití zařízení

Snímače byly speciálně navrženy tak, aby byly schopny odolávat drsnému prostředí automobilového průmyslu. Tyto akcelerometry jsou malé, lehké a mají velkou citlivost. Vhodné pro měření přenosu síly na karosérii automobilu. Přesnost piezoelektrických akcelerometrů ovlivňuje měnící se teplota okolí, vysoká vlhkost nebo rušení vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem. Snímače řady 4508 a 4507 jsou náchylné na vlivy okolí. Díky konstrukci a vhodné volbě materiálu jsme se dostali na minimum těchto nepříznivých vlivů okolí.

Na obr. 3.3 je zobrazen snímač pro měření vibrací karosérie automobilu.



Obr. 3.3 Akcelerometr 4508 B [JURÁNEK, M. & KLEČKA, R. 2009]

Akcelerometry Delta Tron a vyráběné produkty firmy Brüel&Kjaer slouží pro úpravu signálu. Tyto akcelerometry potřebují neustále proudové napájení. Výhodou je, že můžeme použít levné kabely. Díky nízké výstupní impedanci umožňuje připojení k měřicímu zařízení pomocí dlouhého kabelu.

Piezorezistivní akcelerometry Brüel&Kjær (4574)

Snímače jsou zkonstruovány tak, aby dokázaly měřit jak vibraci, tak i statické zrychlení. Mají vysokou teplotní stabilitu (od -55 °C do 121 °C), nízkou spotřebu a dokáže odolat proti nárazu až 10 000 g (gravitační zrychlení).



Obr. 3.4 Akcelerometr 4574 [JURÁNEK, M. & KLEČKA, R. 2009]

Uvedeme si typ akcelerometru, na kterém budeme provádět měření.

ADXL001

Analogové zařízení, které používá širokopásmové akcelerometry.

Vlastnosti

- vysoký výkon akcelerometru
- $\pm 70 \text{ g}$, $\pm 250 \text{ g}$, a $\pm 500 \text{ g}$ dostupné širokopásmové rozpětí
- 22kHz konstrukce rezonanční frekvence
- Vysoká linearita: z rozsahu 0,2%
- Nízká hluchost $4\text{mg}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Spodní frekvenční rozsah u DC (Direct current)
- Úplné rozdílné zpracování signálu

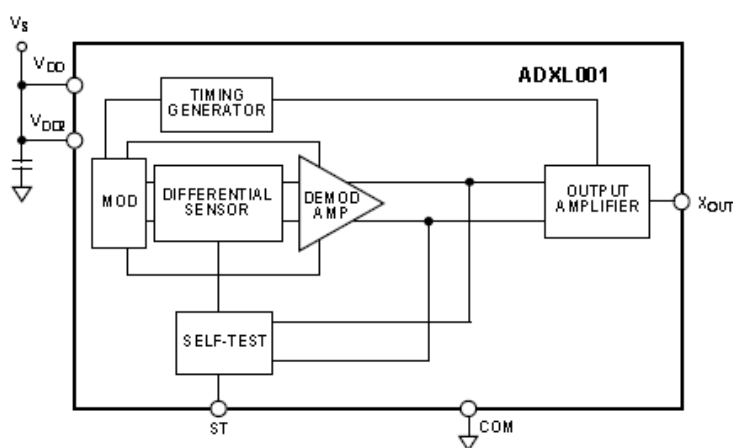
- Vysoká odolnost proti EMI (Electromagnetic Interference)/RFI (Radio Frequency Interference)
- Kompletní elektromechanických testů
- Výstupní poměrové dodávání
- Rychlost zachování vstupního přetížení v průběhu akcelerace
- Nízká typická spotřeba energie: 2,5 mA
- 8 terminálů (vstupů)

Akcelerometr ADXL001 se v současné době používají pro monitorování vibrací, detekci otřesů a největší uplatnění akcelerometru je požití v lékařských přístrojích.

Popis parametrů

Tyto snímače poskytují vysoký výkon a šířku pásma. Ideální pro průmyslové, lékařské a vojenské aplikace, má malé rozměry, nízkou spotřebu. Snímače měří v dynamickém rozsahu, od ± 70 g až ± 500 g s šířkou pásma 22 kHz. Obvod pracuje na napětí zdroje (3,3 až 5) V, je schopen pracovat v teplotním rozsahu (-40 °C až $+125$ °C).

Na obr. 3.5 je zobrazení blokového schématu akcelerometru typu ADXL001.



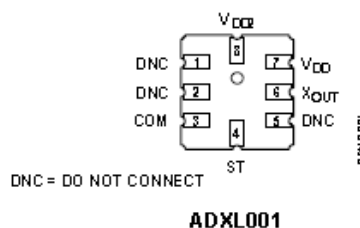
Obr. 3.5 Funkční blokové schéma [ANALOG DEVICES 2010]

Následující tabulka je použití základních parametrů ADXL001, které musíme znát, když budeme provádět měření s tímto typem snímače.

Tab. 3.1 Mezní hodnoty [ANALOG DEVICES 2010]

Parametry	Hodnota
Zrychlení (nějaké osy, bez vlastního pohonu a napájení)	4000 g
Napájecí napětí	-0,3 V až +7 V
Zkrat na výstupu se zemí	Nedefinovaný
Rozsah skladovacích teplot	-65°C až 150°C
Rozsah provozních teplot	-55°C až +125°C
Pájecí teplota (pájení po 10 s)	245°C

Praktická realizace



Obr. 3.6 Zobrazení praktického pouzdra [ANALOG DEVICES 2010]

V tab. 3.2 je znázorněn seznam použitých pinů v pouzdře ADXL001.

Tab. 3.2 Popisu funkčních pinů [ANALOG DEVICES 2010]

Připojení pinů	Zkratky	Popis
1, 2, 5	DNC	Nepřipojené
3	COM	Běžný
4	ST	Vlastní kontrolní test (logický vstup)
6	X _{OUT}	X-osa zrychlení výstupu
7	V _{DD}	3,135 V až 6V připojení k V _{DD2}
8	V _{DD2}	3,135 V až 6V připojení k V _{DD}

3.3 Gyroskopy

Gyroskop byl znám na počátku 18. století. Gyroskopy pracují jako volný rotační setrvačnick. K charakteristice gyroskopu patří nízké energetické ztráty, důsledkem je nejmenší vliv tření. Mechanika tuhého tělesa má v sobě šest stupňů volnosti, tři translační a tři rotační. Cardanův závěs je zobrazen na obr. 3.7, kde vliv translačního pohybu je nežádoucí. Gyroskop je pevně uchycen ve třech na sebe kolmých osách.



Obr. 3.7 Cardanův závěs [HÁJEK, L. & HAMBÁLEK, T. 2010-2011]

3.3.1 Matematický popis

Pro popis vlastnosti gyroskopu uvedeme základní vztahy pro rotační pohyb. Prvním je vztah pro hybnost:

$$L = \mathbf{r} \times \mathbf{p}, \quad (3.1)$$

kde je L - moment hybnosti, \mathbf{r} - polohový vektor, \mathbf{p} - vektor hybnosti.

Po derivaci dostaneme moment síly,

$$N = \mathbf{r} \times \mathbf{F}, \quad (3.2)$$

kde je N - moment síly, \mathbf{F} - vektorová síla.

Nemůžeme vytknout ani moment setrvačnosti. Při rotaci homogenního tenkého obruče k ose, bychom mohli teoreticky vypočítat, jako skalární součin celkové hmotnosti rotujícího tělesa a druhé mocniny vzdálenosti hmoty od osy.

$$I = M \cdot R^2, \quad (3.3)$$

kde je I - moment setrvačnosti, M - hmotnost rotujícího tělesa, R - vzdálenosti hmoty od osy.

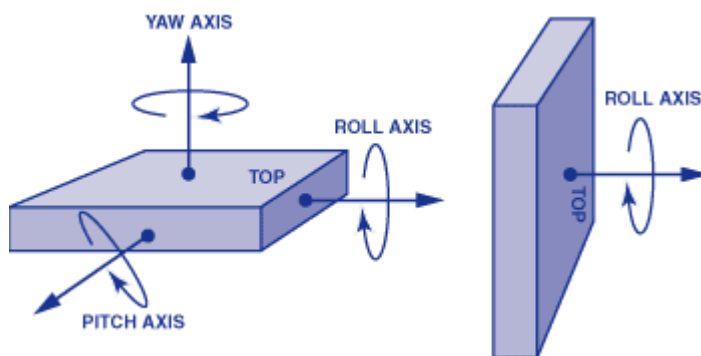
Moment setrvačnosti závisí na rozložení hmoty. Jednotlivé hodnoty musíme přepočítat pro každé jiné těleso. Můžeme narazit i na výpočty, kde moment setrvačnosti neprotíná těžiště, potom bychom museli použít Steinerovu větu.

$$I = I_0 + M \cdot a^2, \quad (3.4)$$

kde je a - vzdálenost osy rotace od osy procházejícím těžištěm.

3.3.2 Gyroskopy v integrovaném provedení MEMS

Tyto gyroskopy obsahují snímač a celou řadu vyhodnocovacích obvodů a logiky. Výstup je analogový, digitální nebo může být kombinací obou dvou. V současné době se gyroskopy uplatňují ve vědě a výzkumu. Například GPS (Global Positioning System), který sleduje pohyb objektů.



Obr. 3.8 Možnosti měření natočení a rotace [VOJÁČEK A. 2009]

Na obr. 3.8 můžeme vidět způsob měření natočení a rotace. Obecně se používá pro měření úhlové rychlosti o tom, jak se objekt rychle otáčí v jednotkách stupňů za sekundu. Rotaci můžeme měřit pouze na jedné ose ze tří os, která je označené jako kolmá osa, příčná osa a podélná osa. Tudiž objekt může na gyroskopu rotovat třemi směry, které jsou vyobrazeny na obrázku.

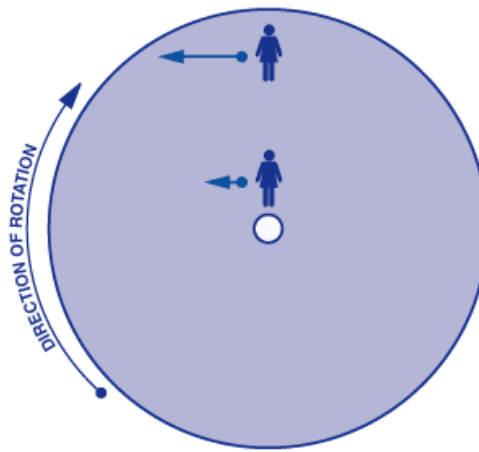
Obecný princip gyroskopů MEMS

Gyroskopy jsou určeny pro měření úhlové rychlosti, kde vlastně určujeme měřený objekt, jak se rychle otáčí ve stupních za jednotku času. Rotaci můžeme měřit vzhledem k jednotlivým osám. Integrované gyroskopy pracují na principu Coriolisovy síly, umí měřit pouze v jednom směru. Pro ostatní směry je nutné zajistit správné natočení a správné umístění součástek.

Coriolisova síla je virtuální síla, působí na hmotný předmět nebo objekt. Objekt se pohybuje rychlostí v soustavě rotující kolem osy rotace úhlovou rychlostí.

$$F_C = 2 \cdot m \cdot v \cdot \omega, \quad (3.5)$$

kde F_C - virtuální síla (celková síla) m - hmotnost, v - rychlost.

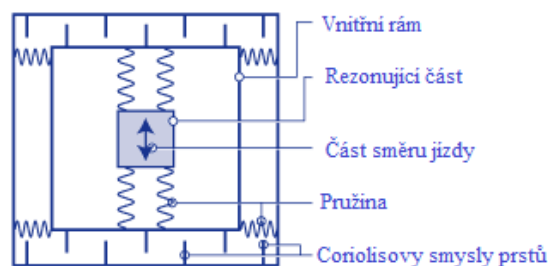


Obr. 3.9 Jednoduchý příklad působení Coriolisovy síly (modrá šipka) na osobu pohybující se od středu k okraji rotujícího kruhu [VOJÁČEK A. 2009]

Na obr. 3.9 vidíme slečnu pohybující se rychlostí od středu rotujícího kruhu směrem k okraji. Při tomto okamžiku na ni působí vzrůstající virtuální síla, která je na kraji kotouče velká. Stejná síla také působí na objekty na naší planetě. Planeta má takovou soustavu os otáčející se kolem své osy.

Provedení samostatného MEMS snímače

Použití Coriolisovy síly v integrovaných gyroskopech používá technologii MEMS. Vytvářejí na čipu s elektronickými obvody i mechanické mikro-součástky, které následně tvoří samostatný snímač.



Obr. 3.10 Zjednodušená struktura snímače MEMS gyroskopu [VOJÁČEK A. 2009]

Základem je rezonující část upevněna v rámu. Vlivem vlastní mechanické rezonance (pružiny) se pohybuje v uvedeném směru, kolmém na směr otáčení. Vzniká Coriolisova síla, která je úměrná rychlosti otáčení. Pro stlačení vnější pružiny rámu způsobí posuv měřících plošek. Výstupem je změna kapacity úměrná velikosti úhlové rychlosti otáčení.

3.3.3 Použití, dělení a typ gyroskopu pro měření

Použití gyroskopů

Použití typů gyroskopu můžeme rozdělit následovně:

- Detekce a měření rotačního pohybu
- Stabilizační jízdní systémy automobilů
- Zpřesňování pozice systémů GPS
- Měření setrvačnosti
- Měření náklonu
- Detekce převrácení, např. automobilu
- atd.

Dělení gyroskopů

Gyroskopy můžeme následně rozdělit do tří skupin:

Rotační gyroskopy - jsou to gyroskopy, které pracují na principu Coriolisovy síly, jsou příčinou dodatečných vibrací v kolmém směru.

Vibrační gyroskopy - gyroskopy jsou doposud nejčastěji používané, protože jsou malé, mají dobrou výkonnost, pro uživatele jsou příjemné

Optické gyroskopy - díky svým specifickým vlastnostem se může řadit mezi dvěma předcházejícími skupinami. Tento typ je založen na Sagnacova jevu v kruhovém laseru.

Použitý typ gyroskopu, na kterém bude prováděno měření je ADXRS450.

ADXRS450

Analogové zařízení, s vysokým výkonem. Používá digitální výstup Gyroskopu

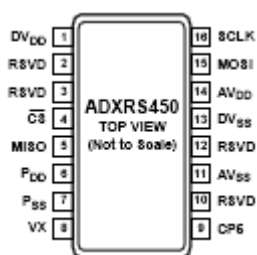
Vlastnosti

- kompletní míra (rychlost) gyroskopu na jediném čipu
- ± 300 °/s úhlové rychlosti snímání
- Odmítnutí vysoké vibrace v širokém frekvenčním rozsahu
- Vynikající 25° za hodinu nulová ofsetová stabilita
- Vnitřní teplotní kompenzace
- 2000 g přetížení napájecím proudem
- SPI (Serial Peripheral Interface) digitální výstup s 16 - bitovým datovým slovem
- Nízká hlučnost a nízká spotřeba

Tab. 3.3 Mezní hodnoty [ANALOG DEVICES 2011]

Parametry	Hodnota
Zrychlení (nějaké osy, 0,5 ms) bez motorové	2000 g
Zrychlení (nějaké osy, 0,5 ms) zdrojové	2000 g
Napájecí napětí (PDD)	- 0,3 V až + 6,0 V
Zkrat na výstupu (z některých pinů vůči zemi)	Nedefinovaný
Teplotní rozsah provozní LCC V balení	- 40 °C až + 125 °C
Teplotní rozsah provozní SOIC CAV balení	- 40 °C až + 125 °C
Teplotní rozsah skladování LCC V balení	- 65 °C až + 150 °C
Teplotní rozsah skladování SOIC CAV balení	- 40 °C až + 150 °C

Zapojení



Obr. 3.12 Praktická realizace [ANALOG DEVICES 2011]

Podle patice zvoleného gyroskopu můžeme použít jednotlivé piny, které jsou popsány v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Popisy funkčních pinů [ANALOG DEVICES 2011]

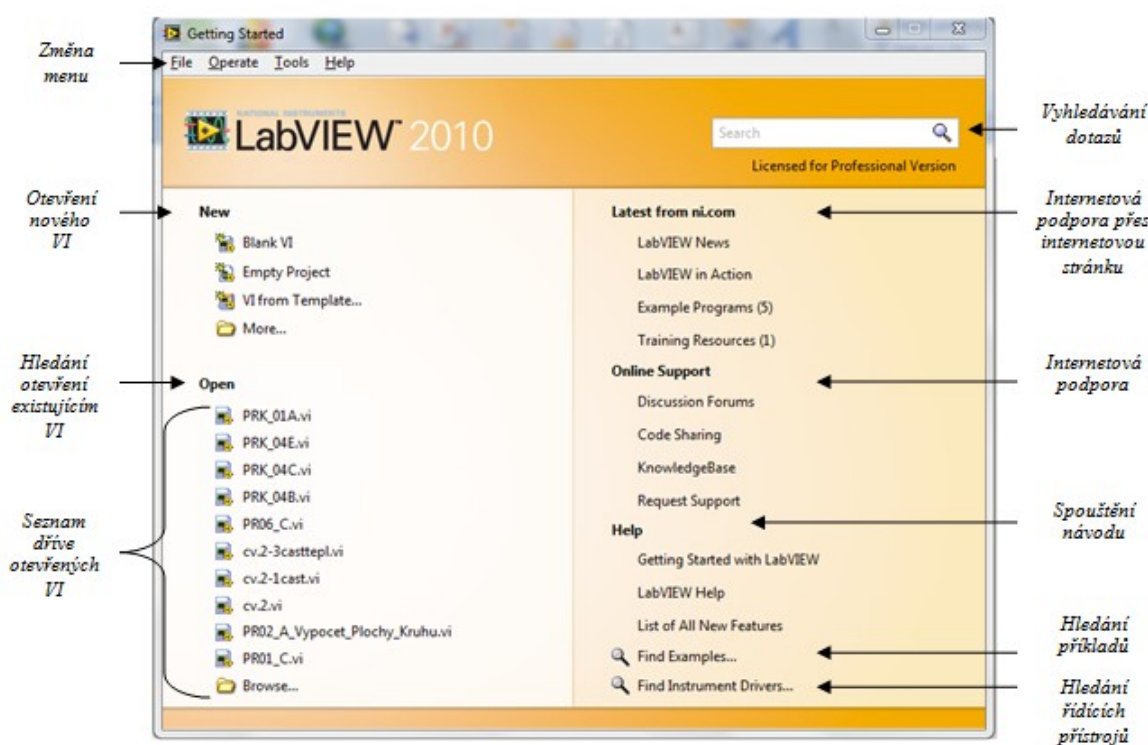
Propojení pinů	Zkratky	Popis
1	DV _{DD}	Digitální regulované napětí
2	RSVD	Vyhrazení. PIN musí být připojen na DV _{SS}
3	RSVD	Vyhrazení. PIN musí být připojen na DV _{SS}
4	\overline{CS}	Výběr čipu
5	MISO	Řídící vstup/závislý výstup
6	P _{DD}	Napájecí napětí
7	P _{SS}	Spínací regulátor země
8	VX	Vysokonapěťové smyčky (uzly)
9	CPS	Vysoké napětí zdroje
10	RSVD	Vyhrazení. PIN musí být připojen na DV _{SS}
11	AV _{SS}	Analogové uzemnění
12	RSVD	Vyhrazení. PIN musí být připojen na DV _{SS}
13	DV _{SS}	Digitální signál země
14	AV _{DD}	Analogové regulování napětí
15	MOSI	Řídící výstup/závislý vstup
16	SCLK	SPI (sériové periferní rozhraní) hodin

[ŠURÁNEK, P. 2010], [JURÁNEK, M. & KLEČKA, R. 2009]

4 LabVIEW

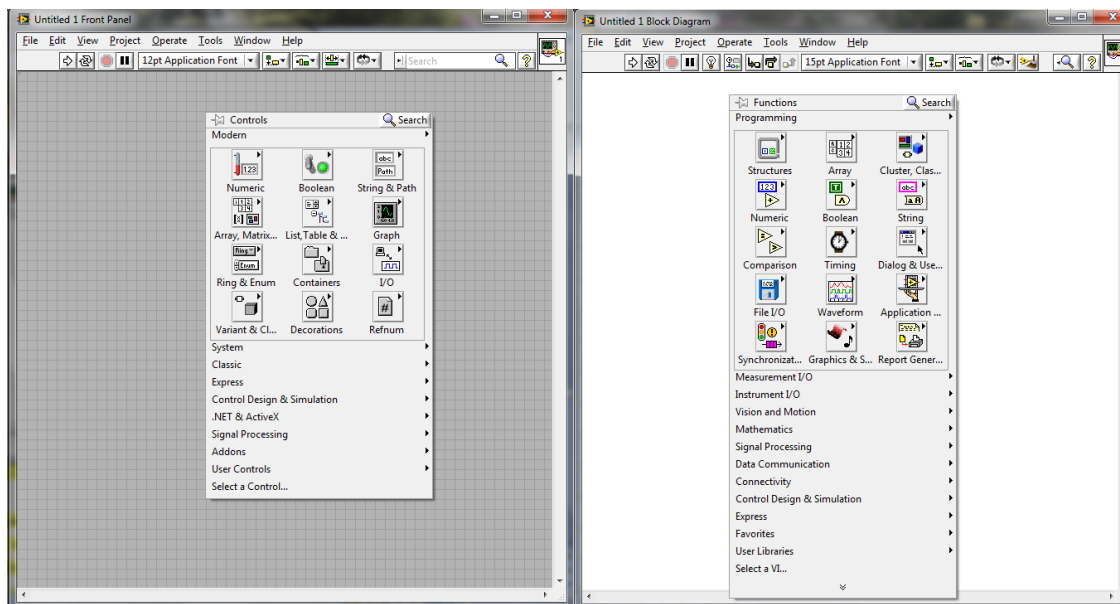
Nástroj pro programování systému k měření, analýze signálu, řízení a vizualizaci technologických procesů je produktem americké firmy National Instruments (NI). Využívá intuitivní grafické ikony, ty se podobají vývojovému diagramu. Dokáže bezkonkurenčně integrovat hardwarové zařízení. Obsahuje několik set knihoven pro analyzování a detekování vizualizačních dat. Všechny knihovny slouží pro vytvoření virtuálních přístrojů.

Na obr. 4.1 vidíme úvodní okno programu LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench). První část programu je menu, kde v menu *File* můžeme nalézt funkce pro založení nového VI (Virtual instrument) a otevření uložených VI. V menu *Operate* nalezneme funkci pro operace s LabVIEW, která je spojena s IP adresou pro spojení a navázání komunikace s přístroji. V menu *Tool* jsou nářadí pro následující operace, jsou propojeny s LabVIEW a okolními přístroji. Poslední menu je *Help*. V *Help* nalezneme odkazy pro hledání příkazů, otevírání nové obrazovky, v níž můžeme vyhledat příklady uložené v našem počítači, ale i třeba na internetu.



Obr. 4.1 Úvodní obrazovka programu LabVIEW

Pro spuštění nového VI pomocí volby *Blank VI* nebo *File, New VI* se zobrazí obrazovka s funkčním a kontrolním panelem, která jsou na obr. 4.2, kde vidíme otevřený čelní panel, blokového diagram, funkční panel a kontrolní panel, kde v nich jsou použity knihovny pro sestavení aplikace.



Obr. 4.2 Zobrazení blokového diagramu (Block Diagram) s funkčním panelem a čelní panel (Front Panel) s kontrolním panelem.

Levá strana obrázku je čelní panel, kde se řeší, jak bude vypadat přípravek ve skutečném provedení. Na pravé straně obrázku je blokový diagram, kde vykonáváme program. Popišme si obecně jednotlivé panely.

Čelní panel je používán jako uživatelské rozhraní určující chování a vzhled aplikace. Pomocí čelního panelu můžeme ovládat aplikaci a to zadávání parametrů, získávání a zpracování informací. Objekty lze libovolně měnit, upravit, nastavovat programově, automaticky upravit a přizpůsobovat jeho velikost okna. Dalšími funkcemi čelního panelu je importování grafických objektů sloužící jako pozadí vzhledu obrazovky nebo jednotlivých prvků. Je možné vkládat volný text, který můžeme měnit. Pomocí kontrolního panelu vkládáme z knihoven jednotlivé komponenty, které zobrazují vzhled programu. V knihovnách můžeme nalézt tlačítka, typy grafů, číselné indikátory nebo kontroly atd. Číselné indikátory zobrazují jen číselné hodnoty, kdež to kontroly umožňují měnit parametry v běhu aplikace. Rozložení čelního panelu je, že na levou stranu jsou přiřazeny kontroly a na pravou stranu indikátory.

Blokový diagram je další součástí každé aplikace programu. Na této obrazovce si navrhne uživatel propojení jednotlivých prvků čelního panelu a jejich zadávaných parametrů. Funkční knihovny se zobrazují stejným způsobem jako kontrolní knihovny rozdílem, že jedna se zobrazuje v čelním panelu a druhá se zobrazuje v blokovém diagramu. Zde můžeme nalézt matematické, geometrické prvky atd.

V čelním a blokové diagramu musí být aplikace provedena tak, aby problém byl jednoduchý, lehký. Struktura blokového diagramu by měla být co nejpřehlednější, z důvodu rychlého nalezení problému a odstranění poruchy v programu.

Nejdůležitější částí tohoto vizualizačního programu je Tools panel, kde můžeme nalézt nástroje pro propojení jednotlivých komponentů, změnu barvy komponentu, posouvání nebo zvětšování prvku, psaní textu.

Poslední důležitou součástí programu je nástrojová lišta, se kterou můžeme vyzkoušet funkčnost vytvořené aplikace, seřazení komponentů.

4.1 Příklady aplikace v LabVIEW

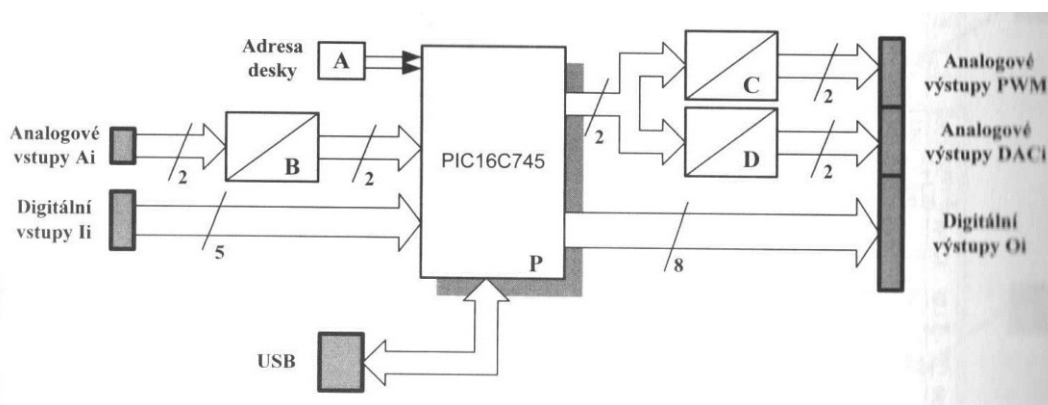
Tato část se zabývá programem LabVIEW ve spojení s jednotlivými zařízení. Prvním experimentem pro získání zkušenosti je využití stavebnice karty K8055 firmy Velleman, další způsobem aplikace je s multifunkční kartou NI USB-6008/6009 (Universal Serial Bus). Dalším bodem bude číslicový multimetr DMM NI USB-4065.

4.1.1 Experimentální USB karta Velleman K8055

Tato karta se dá koupit jako stavebnice nebo vyhotovený výrobek.

Základní popis karty K8055

Základní části experimentální karty je na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Blokové schéma karty K8055 [HAVLÍČEK, J., VLACH, M., VLACH, J. & VLACHOVÁ, V. 2008]

Tento typ karty má v sobě zabudovaný mikrokontroler označený na obrázku P. Adresy karty můžeme zvolit v rozsahu 0 až 3, pět číslicových vstupů pro rychlé odzkoušení, dva programové čítače podle nich můžeme nastavit čas proti zákmitu ochrana kvůli nesprávného přečtení změn. Osm číslicových vstupů jsou obvykle tvořeny tranzistory s otevřeným kolektorem. Dva analogové vstupy označeny písmenem B s osmibitovým převodníkem, dva analogové výstupy DAC1 a DAC2, který je tvořen osmibitovým převodníkem. Napájení této karty je přes rozhraní USB. Použití analogového vstupního napětí je v rozsahu od 0 V až do 5V.

Připojení karty k počítači je nutné nastavit adresy pomocí zkratkujících propojek. Nastavení těchto propojek je uveden v tab. 4.1.

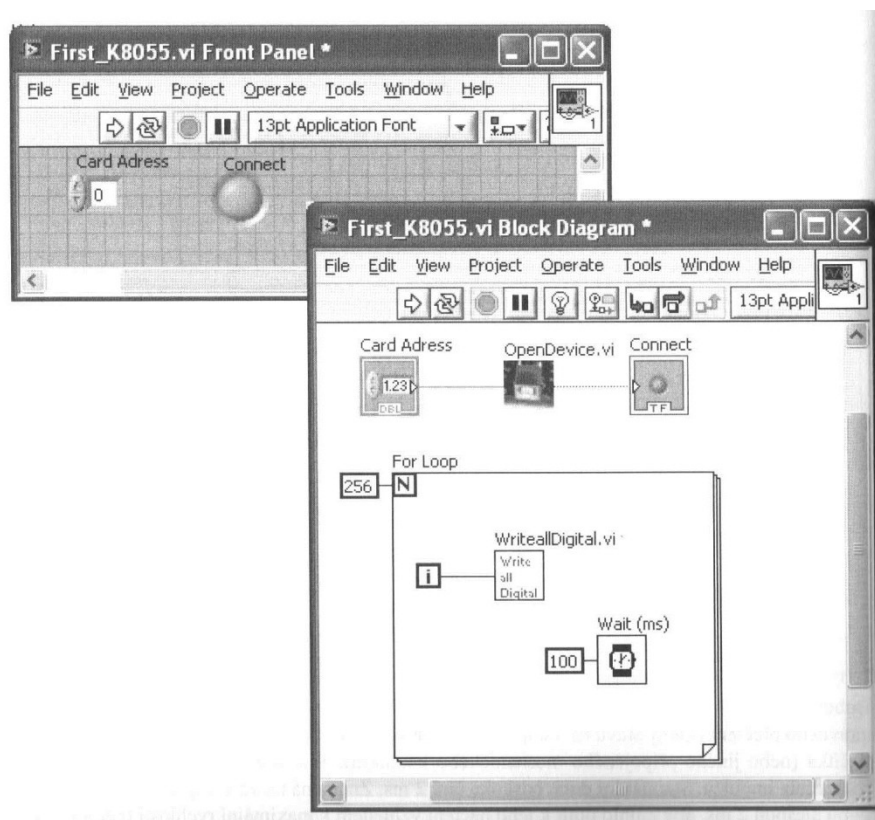
Tab. 4.1 Adresy karty K8055 (propojek SK5 a SK6) [HAVLÍČEK, J., VLACH, M., VLACH, J. & VLACHOVÁ, V. 2008]

Propojka		Adresa desky
SK5	SK6	
Spoj	spoj	0
Rozpoj	spoj	1
Spoj	rozpoj	2
Rozpoj	rozpoj	3

Programování v LabVIEW

Pro kartu K8055 v prostředí LabVIEW používáme jenom typy VI. Při stažení jednotlivého VI, buď z internetových stránek se stáhnou i jednotlivé příkazy z knihovny *K8055D.DLL*, které jsou v příručce [Havlíček, J., Vlach, M., Vlach, J. & Vlachová, V., 2008]

Na obr. 4.4 můžeme vidět blokový diagram a čelní panel *First_K8055.vi*. Čelní panel obsahuje ovládací prvky pro zadání adresy a prvky indikátorů propojeny s deskou. Důležitou částí je, že nesmíme zapomenout program uložit pod jeho jménem *First_K8055.vi*. Spuštění programu pomocí funkce *Run* zjistíme funkčnost programu tím, že se začne rozsvěcovat led diody v binárním kódu od 0 do 255. Dosáhne-li binárního čísla 255, se cyklus zastaví a všechny diody svítí.



Obr. 4.4 Blokový diagram *First_K8055.vi* [HAVLÍČEK, J., VLACH, M., VLACH, J. & VLACHOVÁ, V. 2008]

Popis obvodu je definován tak, že po uložení souboru se vloží do blokového diagramu ikonu virtuální přístroje. Otevření zařízení *OpenDevice.vi* ze subpalety následně přejdeme do SubVI. Z vytvořeného problému a ze zvoleného SubVI vybereme požadovaný VI. Dalšími prvky jsou kontroly *Card Address*. Vstupuje do *OpenDevice.vi* a výstupem je indikátor tvořený názvem *Connect*. Součástí programu je řešení automatického zápisu do číslicových výstupů. Číslicový kód je vyobrazen kombinací rozsvícení led diod. Do blokového diagramu vložíme strukturu *For Loop*, do ní postupně vkládáme funkci pro zápis číslicových výstupů realizována blokem *Write||Digital.vi*. Vstupem bloku je interakční smyčka *For*. K počtu smyček přiřadíme konstantu 256, pro každý cyklus je rovnající pořadovému číslu cyklu, zapsány do jednotlivých použitých číslicových výstupů. Pro zpomalení smyčky vložíme blok pojmenovaný *Wait*, který zpomalí smyčku s dobou 100 ms.

4.1.2 Multifunkční karta NI USB-6008/6009

Tento typ měřicí karty NI USB-6008 byl použit pro vlastní experiment. Karta umožňuje zaznamenávat údaje do počítače a následně zpracovat signály v programu LabVIEW.

Model multifunkční karty lze vidět na obr. 4.5, která se připojuje s počítačem přes USB rozhraní. Lze provádět standardní aplikace s využitím prostředků MAX (Measurement & Automation Explorer) a NI-DAQmx (DAQ-Data Acquisition).



Obr. 4.5 Multifunkční karta NI USB-6008 [National Instrument 2012]

Multifunkční karta USB-6008 je tvořena 8 analogovými vstupy a 2 analogovými výstupy, 12 číslicových vstupů a výstupů, ty komunikují v obou směrech, které mají 14 bitový čítač. Nalezneme i 32 bitový čítač. Modul má vyvedený konektor pro napětí na +5 V, které získá z rozhraní USB a s referenčním napětí +2,5 V ze stabilizátoru pro A/D převodník. Jeden 32 bitový má 5 MHz rozsah. Karta má v sobě dvanáct digitálních vstupních a výstupních linek. Multifunkční karta má dvě nasouvací svorkovnice, pomocí nich připojujeme vstupy/výstupy systému. Je to jednoduché pro snadné a rychlé měření.

Na obr. 4.6 jsou popsány základní rozdíly mezi multifunkční kartou USB-6008 a multifunkční kartou USB-6009.

Product	Analog Inputs	Input Resolution	Max Sampling Rate (kS/s)	Analog Outputs	Output Resolution	Output Rate (Hz)	Digital I/O Lines	32-Bit Counter	Triggering
USB-6008	8 single-ended/4 differential	12	10	2	12	150	12	1	Digital
USB-6009	8 single-ended/4 differential	14	48	2	12	150	12	1	Digital

*Obr. 4.6 Porovnání multifunkční karty USB-6008 s multifunkční kartou USB-6009
[National Instrument 2012]*

V tab. 4.2 jsou popsány podrobnější specifikace. Tyto specifikace jsou typické při 25°C, pokud to není uvedeno jinak.

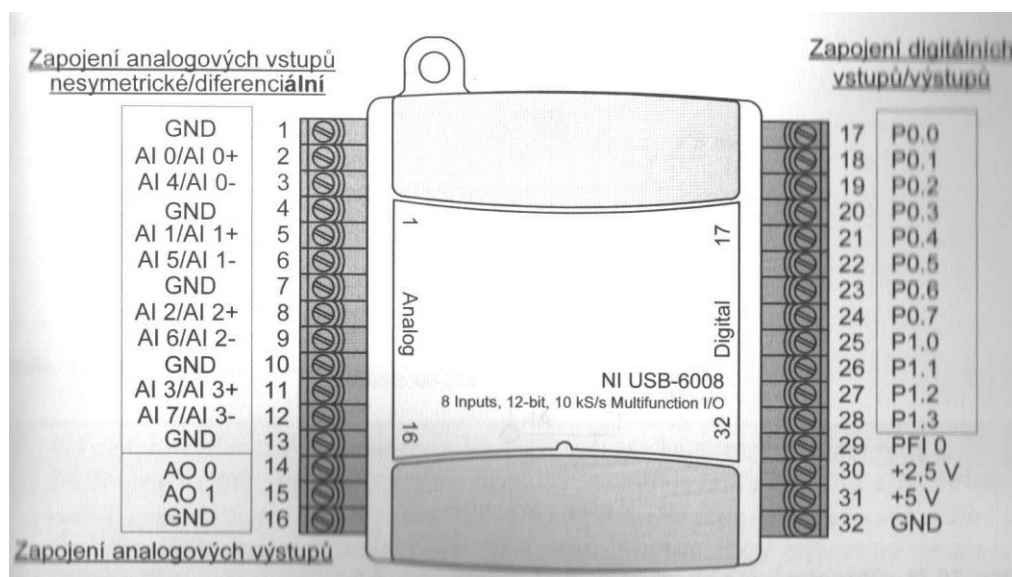
Tab. 4.2 podrobné specifikace USB-6008 [National Instrument 2012]

Analogové vstupy	
Analogové vstupy	8 jednostranných, 4 diferenciálních, software volitelné
Vstupní rozlišení	12 bitový diferenciální, 11 bitový jednostranný
Maximální vzorkovací frekvence	10 kS/s
AI FIFO	512 byte
Rozlišení načasování	41,67 ns (24 Mhz časové základny)
Přesnost časování	100 ppm aktuální vzorkovací frekvence
Vstupní rozsah	
Jednostranné	$\pm 10\text{ V}$
Diferenciální	$\pm 20\text{ V}, \pm 10\text{ V}, \pm 5\text{ V}, \pm 4\text{ V}, \pm 2,5\text{ V}, \pm 2\text{ V}, \pm 1,25\text{ V}, \pm 1\text{ V}$
Pracovní napětí	$\pm 10\text{ V}$
Vstupní impedance	144 k Ω
Ochrana proti přepětí	± 35
Zdroj spouštění	Software nebo externí digitální spouštěč
Systém hluku	
Jednostranné	
$\pm 10\text{ V}$ rozsah	5 mV střední hodnoty
Diferenciální	
$\pm 20\text{ V}$ rozsah	5 mV střední hodnoty
$\pm 1\text{ V}$ rozsah	0,5 mV střední hodnoty

Analogové výstupy	
Analogové výstupy	2
Výstupní rozlišení	12 bitový
Maximální obnovovací frekvence	150 Hz, software časování
Výstupní rozsah	0 až + 5 V
Výstupní impedance	50 Ω
Výstupní proud pohonu	5 mA
Stav provozu	0 V
Rychlost přeběhu	1 V/ μ s
Zkratový proud	50 mA
Absolutní přesnost (bez zatížení)	7 mV typických, 36,4 mV maximální v plném rozsahu

V tabulce jsem dále nerozebíral digitální vstupy ani výstupy, protože tyto vstupy a výstupy jsem nepoužíval. [National Instrument 2012]

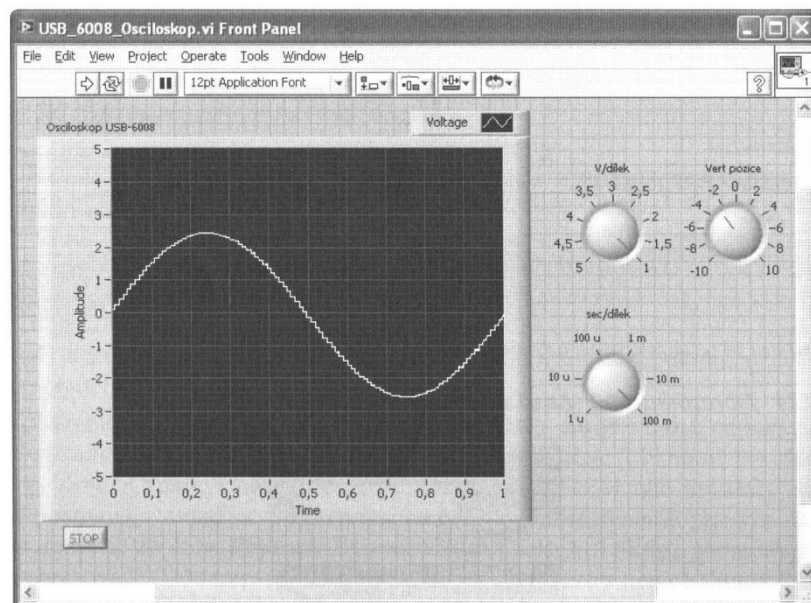
Na obr. 4.7 můžeme vidět rozmístění vstupních a výstupních signálů multifunkční karty NI USB-6008/6009.



Obr. 4.7 Rozmístění signálů na konektorech multifunkční karty NI USB-6008/6009
[HAVLÍČEK, J., VLACH, M., VLACH, J. & VLACHOVÁ, V. 2008]

Příklady použití karty v LabVIEW

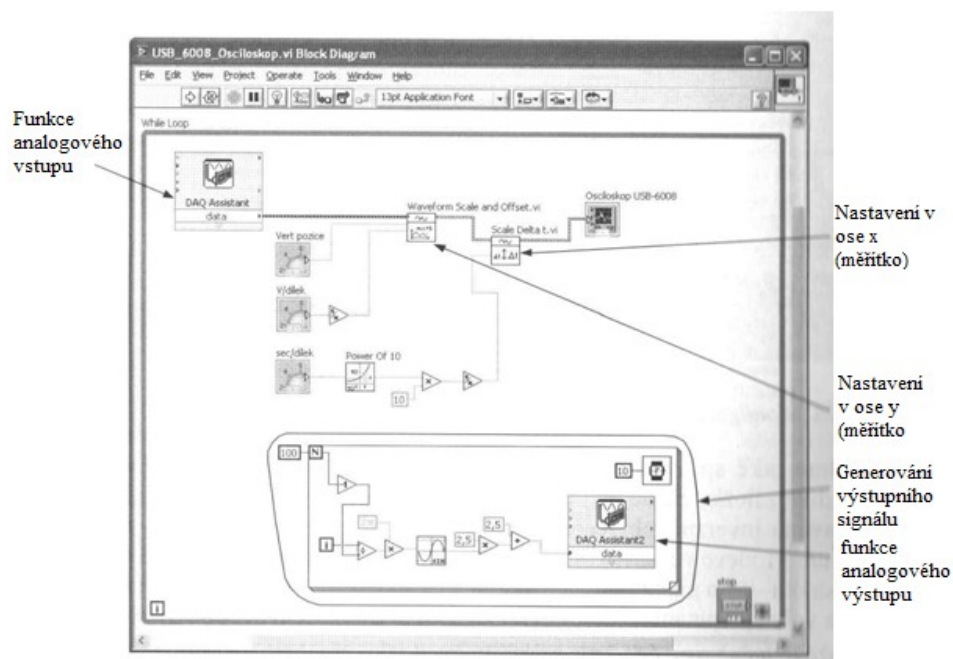
Při práci využívané prostředí LabVIEW lze využít vlastnosti zařízení DAQ. Pomocník při tvorbě VI je použita funkce DAQ ze subpalety *NI-DAQmx*. Na obr. 4.8 si ukážeme čelní panel *USB_6008_Osciloskop.vi* je realizován virtuální přístroj osciloskopu. Pro realizaci obrazovky osciloskopu vložíme *Waveform Graphs*, kde se zobrazují signály. Další prvky je použity *Dial*, které slouží k nastavování a úpravě zobrazení signálu.



Obr. 4.8 Čelní panel *USB_6008_Osciloskop.vi* [HAVLÍČEK, J., VLACH, M., VLACH, J. & VLACHOVÁ, V. 2008]

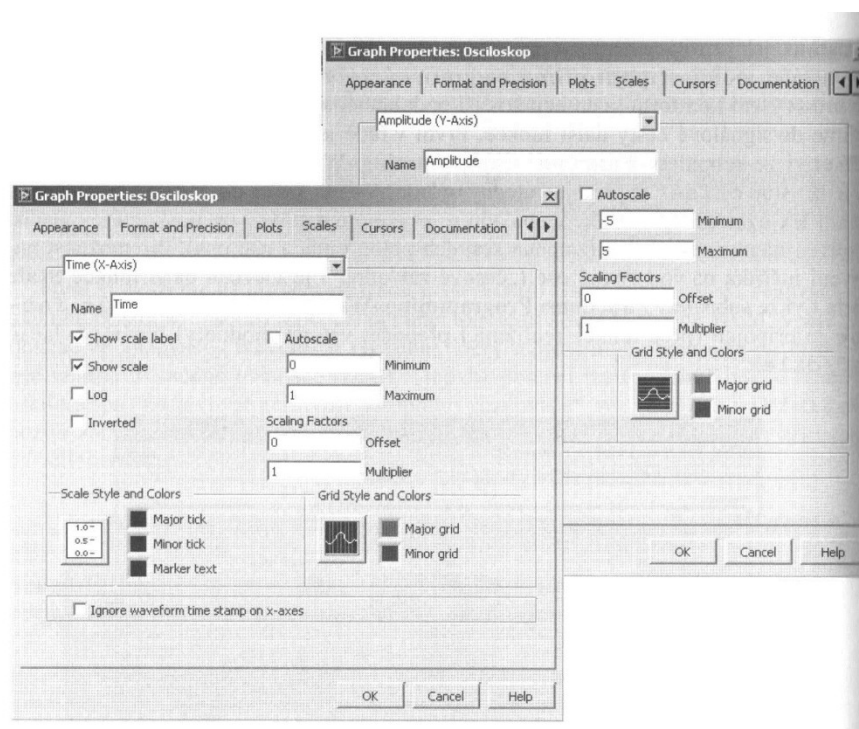
Na obr. 4.9 je zobrazený blokový diagram funkce *USB_6008_Osciloskop.vi*. Funkce programu je vložena do smyčky *While Loop*. Analogový signál se čte z analogového vstupu realizovaný *DAQ Assistant*. Výstupní signál této funkce je přiveden do funkce *Waveform Scale and Offset.vi*, kde je použit kvůli zvýšení komfortu přístroje.

Další použité funkční prvky jsou ovladač *Vert* pozice, ovladač *V/dílek*, matematické operace, *Scale Delta.vi*, scale factor, otočný ovladač *sec/dílek*, které jsou propojeny podle následujícího obrázku.



Obr. 4.9 Blokový diagram USB_6008_Oscilloskop.vi [HAVLÍČEK, J., VLACH, M., VLACH, J. & VLACHOVÁ, V. 2008]

Správná funkce nastavení rozsahu a měřitek os x, y. Nastavíme konfiguraci podle obr. 4.10, kde nastavíme zvolené parametry pro vyobrazení průběhu. Nastavení měřítka, otočných ovladačů na záložky, ovladače rozsahu hodnot a popisy signálu atd.



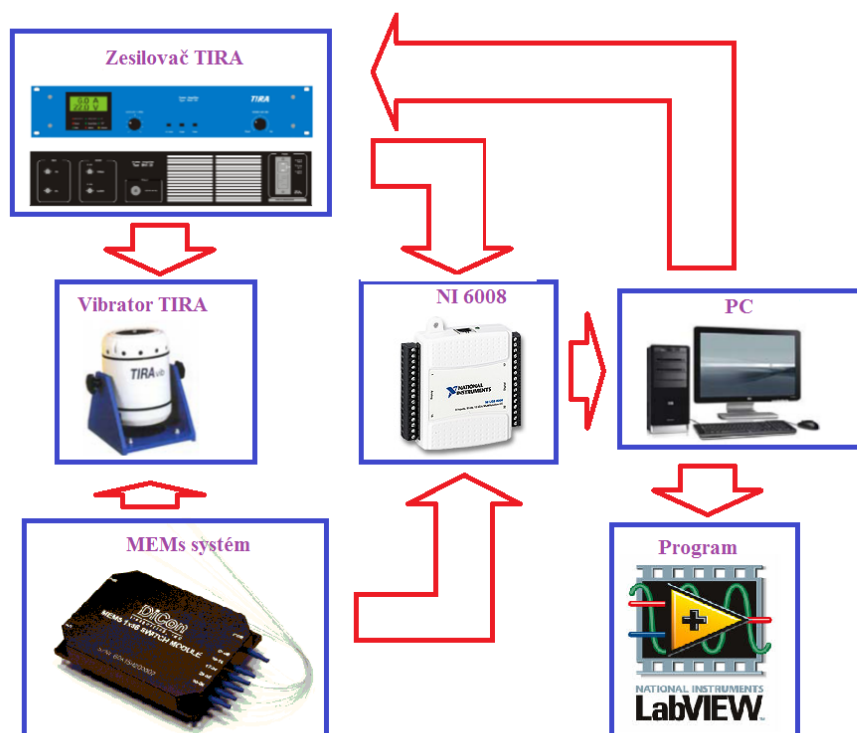
Obr. 4.10 Konfigurace grafického zobrazovače pro úlohu USB_6008_Oscilloskop.vi [HAVLÍČEK, J., VLACH, M., VLACH, J. & VLACHOVÁ, V. 2008]

Následně upravíme jednotlivé záložky a parametry osciloskopu, poté můžeme odzkoušet osciloskop bez připojení externích zdrojů signálu, je vytvořen kód pro generování výstupního signálu. Na výstup přivádíme generovaná data a výsledkem je simulovaná sinusovka. Tuto část můžeme odzkoušet a při připojení vnějšího signálu vypustit.

[HAVLÍČEK, J., VLACH, M., VLACH, J. & VLACHOVÁ, V. 2008]

5 Návrh měřicího řetězce

Na obr. 5.1 můžeme vidět návrh měřicího řetězce. Měřicí řetězec ukazuje postupné bloky operací pro měření. Měření akcelerometru musíme napájet konstantním napětím, který bude realizován zdrojem konstantního napětí. Pro zaznamenávání údajů potřebujeme součástky pro jeho realizaci. Jednotlivé funkční bloky nám reprezentují přístroje pro měření akcelerometru.



Obr. 5.1 Návrh měřicího řetězce

Začneme prvním funkčním blokem a to je počítač. Počítač je nejdůležitější zařízení, který slouží ke generování a měření signálu. Signál generujeme pomocí zvukové karty. Pomocí Signal Analyser budeme schopni generovat signál. Tento program bude popsán po popisu návrhu měřicího řetězce. V Signal Analyser nadefinujeme bílý šum pro vykreslení frekvenční charakteristiky, protože kdybychom budily harmonickým nebo sinusovým signálem, tak se vybudí odezva na jedné frekvenci. Při proměření širokého frekvenčního pásma pro určení frekvenčního přenosu, bych musel měření opakovat pro různé frekvence, abych byl schopen vykreslit frekvenční přenos. Měření by potom trvalo mnohem déle, proto využiji bílý šum, který má ve svém spektru všechny frekvence ze zvoleného pásma najednou. Další výhodou bílého šumu je, že je rychle

měřitelný výsledek a rychlý výpočet již při jednom měření. Nesmíme zapomenout na to, že zvuková karta je schopna budit signál jen plus mínus jeden volt.

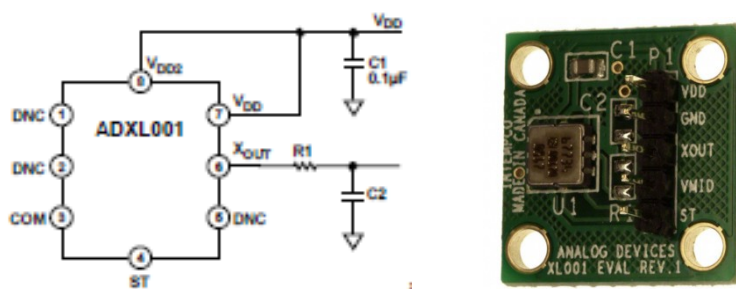
Druhým funkčním blokem je zesilovač neboli analyzátor TIRA, který slouží pro napájení vibrátoru TIRA.

Třetím funkčním blokem je samostatný vibrátor TIRA, na kterém je připevněn MEMS systém, kde pomocí vibrací MEMS zaznamenává údaje a přeposílá do měřicí multifunkční karty USB-6008.

Čtvrtým funkčním blokem je MEMS systém. MEMS systém je připevněn k vibrátoru TIRA. Tento blok je reprezentován MEMS akcelerometrem nazýván EVAL-ADXL001-70Z. Toto řešení je realizováno pomocí akcelerometru ADXL001, který je připájen k desce plošného spoje s dalšími elektronickými součástkami.

EVAL-ADXL001-70Z

Na obr. 5.2 je znázorněno připojení akcelerometru ADXL001 do obvodu, který tento obvod je reprezentován ve struktuře MEMS systému a vpravo je vykreslena plošná deska ve tvaru praktické zobrazení MEMS akcelerometru.



Obr. 5.2 Vlevo schéma zapojení a vpravo praktická realizace obvodu s ADXL001[ANALOG DEVICES, 2009]

Obvod je navržen, aby umožnil uživatelský konfigurovatelný dolno-propustným filtrem k připojenému výstupnímu zařízení. Kdybychom nepotřebovali dolno-propustný filtr, musel by uživatel zkrátit R1 společně lamelově. Lamely jsou součásti, které umožňují provádět vlastní aplikaci dolno-propustného filtru na výstup. Doporučuje se, aby kondenzátor (22 nF) byl umístěn na C2 pro lepší odmítnutí EMI.

V_{DD} a V_{DD2} jsou interně spojeny nebo zkratovány na desce. Tento vstup slouží pro připojení plusové svorky napětí vůči zemi. Zem je třetí pin, který vstupuje do akcelerometru a výstup je reprezentován pro tento jednoosý akcelerometrem osmým pinem. Piny jedna, dva a pět nejsou připojeny. Více informací k tomuto MEMSu jsou

popsány v parametrech akcelerometru ADXL001, který je realizován integrovaným obvodem.

Pátým funkčním bodem je multifunkční karta USB-6008 od společnosti NI. V tomto funkčním bloku se řeší to, že výstup zesilovače nebo analyzátoru je připojen na vstup prvního analogového kanálu a z MEMS akcelerometru je přiveden do druhého vstupního analogového kanálu. Multifunkční karta vyšle informace nebo popřípadě signál z měření přes sériové rozhraní do počítače pomocí USB kabelu. V počítači je spuštěn program, který následně provádí operace.

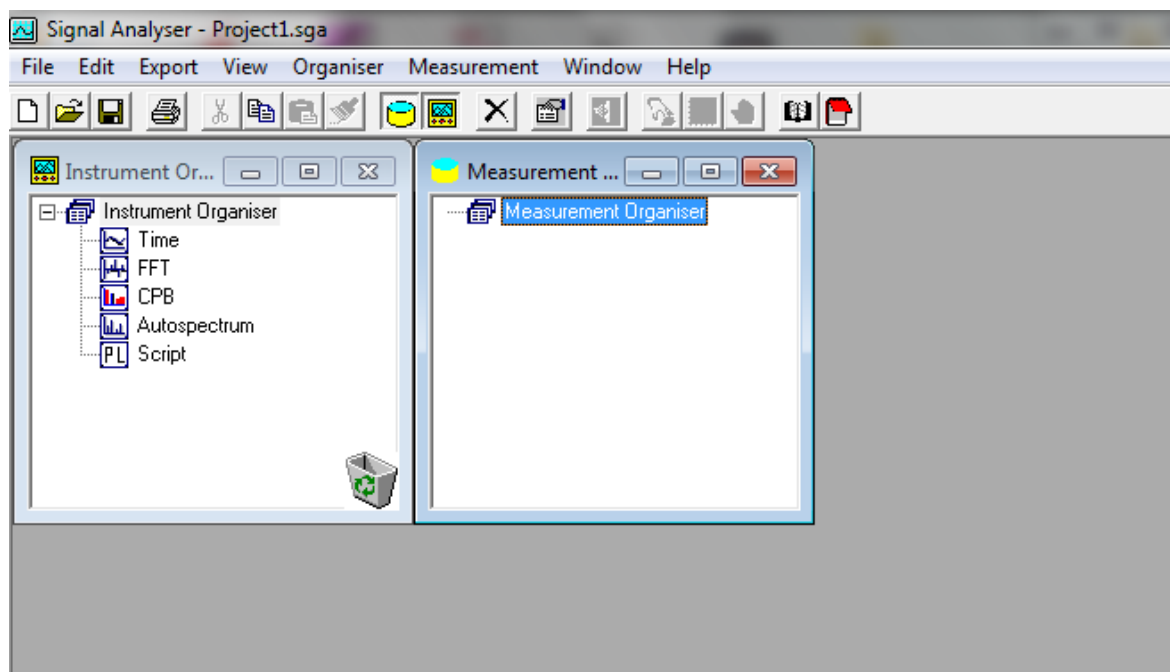
Šestým funkčním blokem je program LabView, který je spuštěn v počítači. Kde jednotlivé vstupy zaznamenané měřicí kartou pomocí funkčních bloků vyvoláme v programu. Signály, které jsou zaznamenány v programu, se budou následně sloužit k výpočtu a popřípadě k vykreslení jednotlivých charakteristik.

Všechny tyto funkční bloky jsou podle návrhu měřicího řetězce prakticky propojeny jednotlivými vodiči do jednotného celku.

Signal Analyser

Tento program slouží ke zpracování časových záznamů signálu. Slouží pro generování signálu pomocí zvukové karty nebo vykreslení a úpravě signálu z měřených dat. Výsledky znázorněných průběhů v grafu jsou vytvářeny v prostředí Microsoft Graph. Vstupní signál je v programu reprezentován ve stromové struktuře, který je odpovídající jednomu měření s jednotnou vzorkovací frekvencí. Měřené signály lze načíst ze zdrojových dat různými způsoby a využity v různých formách. Připojení jednotlivých signálů včetně nastavení přístrojů a načtení dat je možné uložit do souboru projektu s příponou SGA.

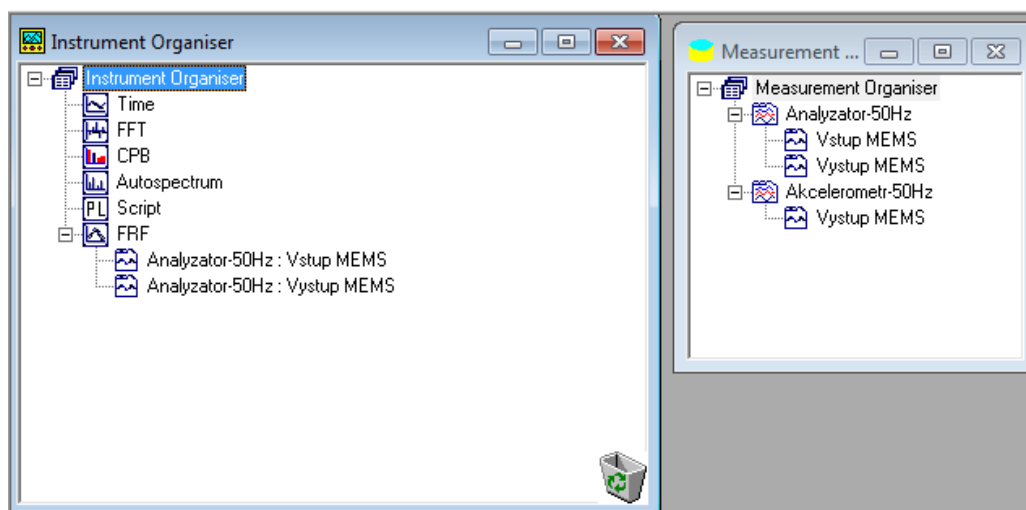
Na obr. 5.3 je znázorněn program při jeho spuštění a následně pro další zpracování a vykreslení průběhů ze změřených údajů.



Obr. 5.3 Program Signal Analyser při spuštění

Ovládání programu můžeme provést několika způsoby. Z obrázku jde vidět k dispozici hlavní menu, který se nachází v horním pruhu hlavního okna. Data a přístroje jsou graficky přehledně umístěny do stromových struktur. Hlavním menu najdeme operace v programu například ukládání, spouštění načítání projektu, načítání změřených dat, generování signálu, úprava průběhů signálu a podobně. Zaměřím se na funkce, které jsem použil pro měření bakalářské práce. Tento program nebyl součástí bakalářské práce, proto bych ho důkladně nepopisoval. Využil jsem tento program, protože umožnil generování buzení přes zvukovou kartu. Kvůli špatnému zobrazení průběhu jsem si musel zvolit tento program pro vykreslení jednotlivých signálů, vykreslení Nyquistovy charakteristiky a LFCH z uložených hodnot.

Na obr. 5.4 můžeme ještě upozorovat dvě okna a to Measurement Organiser a Instrument Organiser.



Obr. 5.4 Zobrazení oken při spuštění programu (vlevo *Instrument Organiser* a vpravo *Measurement Organiser*)

Vpravo vidíme okno *Measurement Organiser*. Toto okno slouží pro generování signálu a načítání hodnot z textového souboru pomocí insert tam si vybereme, jestli chceme načíst hodnoty nebo generovat signál. Následně nastavíme buď parametry pro generování, nebo nastavení řádků a sloupců pro vykreslení signálu z uložených dat. Pro kontrolu si zobrazíme grafy. Vložíme přesunutím do jednoho panelu a následně s nimi pracujeme.

Vlevo na obrázku je zobrazen *Instrument Organiser*. Toto okno slouží pro výpočet charakteristik, například Nyquistovy charakteristiky a LFCH. Signály, které chceme zpracovat a vykreslit použijeme funkci FRF (Frequency Response Function). Pravým tlačítkem myši dáme parametry a nastavíme charakteristické veličiny podle toho, co chceme vykreslit. Nejprve než přesuneme signály do této funkce pro vykreslení charakteristik. Upravíme vstupní a výstupní signál tak, že pomocí parametrů nastavíme tak, že posuneme amplitudu na počátek souřadného systému, potom můžeme vykreslit charakteristiky, které potřebujeme. Potřebné charakteristiky vložíme do dokumentu pro následné vyhodnocení.

Frekvenční charakteristiky (FRF)

Měření lineárních soustav lze porovnáním amplitudy a fáze harmonického signálu na vstupu a výstupu zkoumáme typy soustavy. Pro urychlení měření je možné použít bílý nebo růžový šum. Pro měření sinusovým průběhem bychom museli pro jednotlivé frekvence zaznamenávat údaje a trvalo by to dosti dlouho, proto je lepší použít bílý popřípadě růžový šum. Pomocí aplikace FFT (Fast Fourier Transform) umožní u vstupních

a u výstupních signálů se zjistí amplituda všech složek a jejich rozdíl fáze. Bílý šum se využívá, protože se nemění amplituda, ale mění se jeho frekvence využita v jeho spektru.

Výpočet frekvenčního přenosu je dán

$$G(k) = \frac{Y(k)}{X(k)} = \frac{|Y(k)|}{|X(k)|} \exp(j(\beta - \alpha)) = A(k) \exp(j\varphi(k)), \quad k = 0, 1, 2, \dots, J/2 \quad (5.1)$$

kde, $Y(k), X(k)$ - výstupní a vstupní signál, α, β - fázový posun, $\varphi(k)$ - fáze frekvenčního přenosu, $A(k)$ - amplituda, J - délka záznamu, k - pořadnice vzorků.

Tento vzorec lze použít pro vyhodnocení dvojice záznamu vstupních a výstupních signálů.

V případě autospekter je vhodné, aby náhodný šum obou signálů eliminoval průměrování. Vyhodnocení vstupních a výstupních signálu se opakuje výpočet vícekrát. Každé dvojici vstupních a výstupních signálů lze přiřadit frekvenční přenos.

Následující vzorec je výsledné vyhodnocení přenosové funkce. Celý vypočtený přenos se označuje ve FFT analyzátorech je označený H1.

$$H1(k) = \frac{\sum_{o=1}^O Y(k, m) \cdot X^*(k, m)}{\sum_{o=1}^O X(k, m) \cdot X^*(k, m)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, J/2 \quad (5.2)$$

kde, O - pořadí měření (chyba), o - index pořadí měření.

V čitateli se nachází komplexní číslo a ve jmenovateli je kladné reálné číslo. Stejně měření a vyhodnocení spekter je použito pro průměrování k zpřesnění odhadu frekvenční charakteristiky. Přenos určíme z většího počtu měření.

Vzorec pro výpočet přenosové funkce, značí se v analyzátoru H2 pro aditivní chybu měření na vstupu soustavy.

$$H2(k) = \frac{\sum_{o=1}^O Y(k, m) \cdot Y^*(k, m)}{\sum_{o=1}^O X(k, m) \cdot Y^*(k, m)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, J/2 \quad (5.3)$$

Některé FFT analyzátory znázorňující frekvenční charakteristiku, která je dána geometrickým průměrováním obou vypočtených charakteristik je označen H3.

$$H3(k) = \sqrt{H1(k) \cdot H2(k)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, J/2 \quad (5.4)$$

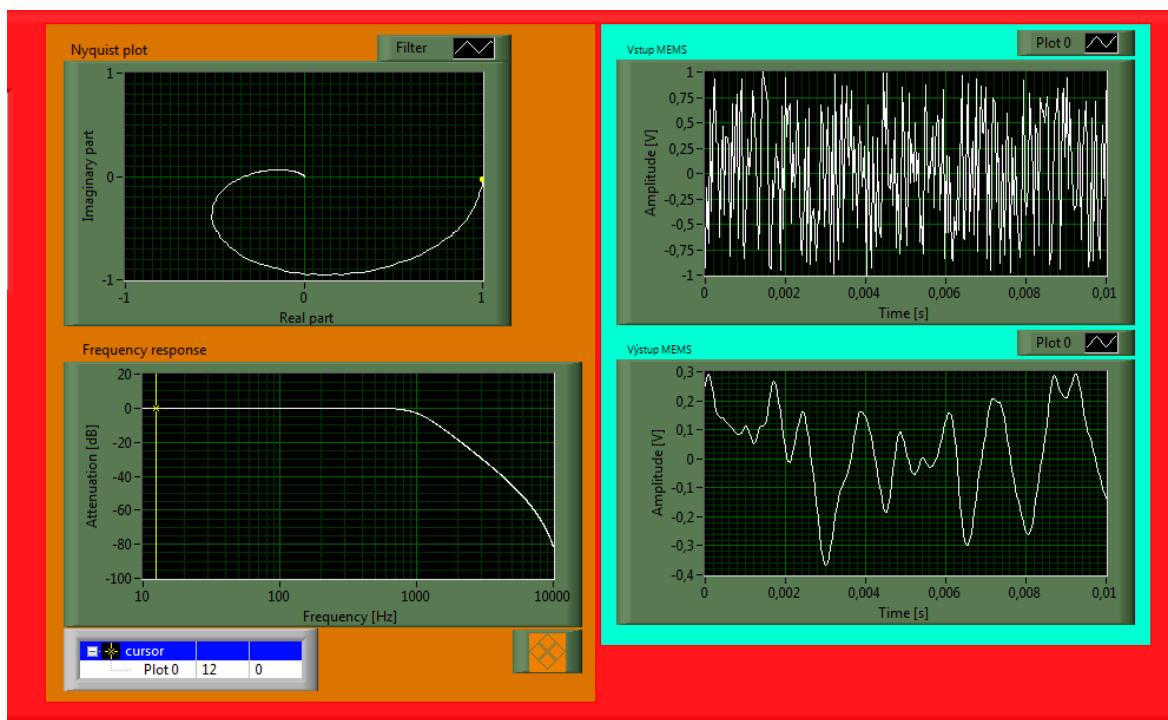
Postup výpočtu frekvenčních charakteristik je vhodný pro určité konkrétní posouzení testované soustavy.

Odvození tohoto vzorce je ve skriptech (Signal Processing str. 82,83). Odvození výsledku není důležité pro určení funkce přenosu, protože celý výpočet nám pro dělají programy.

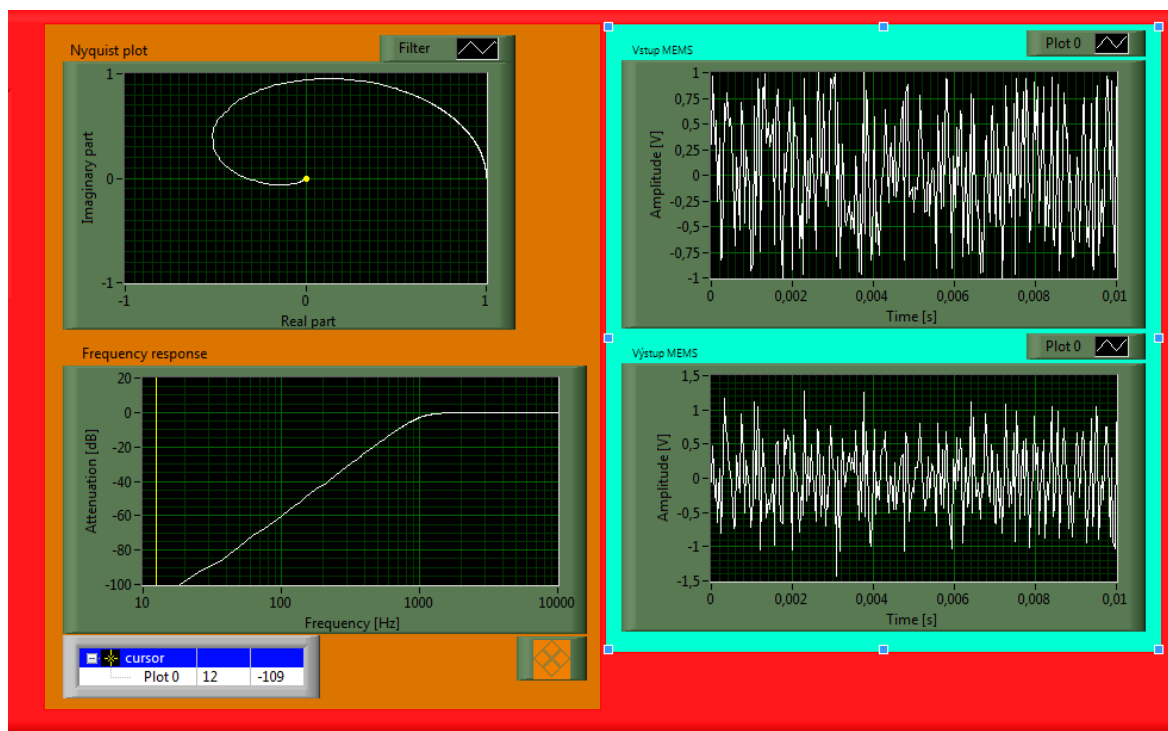
[Tůma, J. 2008]

6 Měření a vyhodnocení frekvenčních charakteristik

Z návrhu měřícího řetězce jsem schopen vytvořit obvod pro měření vstupního a výstupního signálu MEMS akcelerometru. Zapojení obvodu je stejný jako při návrhu měřícího řetězce. Na obr. 6.1 a obr. 6.2 jsou znázorněné teoretické průběhy, které budou podobným způsobem vykreslovány v průběhu měření.



Obr. 6.1 Teoretické vykreslení vstupních, výstupních signálů a teoretické vykreslení vypočtených charakteristik proporcionálního členu.



Obr. 6.2 Teoretické vykreslení vstupních, výstupních signálů a teoretické vykreslení vypočtených charakteristik derivačního členu.

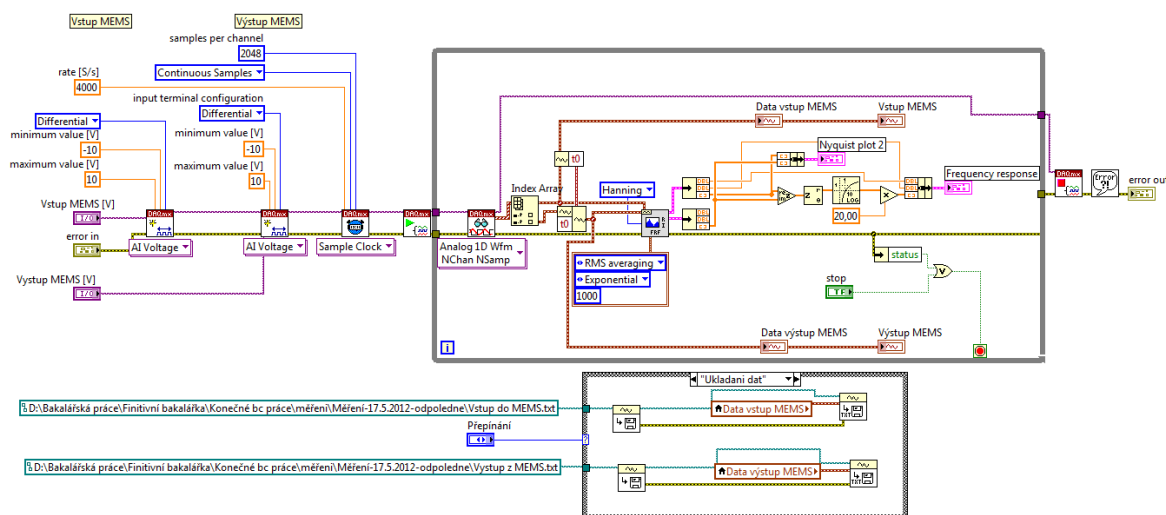
Pro měření experimentu použijí budící signál. Tento signál je buzen přes zvukovou kartu pomocí programu Signal Analyser, kde v tomto programu si zvolím typ signálu s rozsahem napětí. Signál analyzátoru je napájen střídavým proudem, generovaným bílým šumem. Pro měření je vhodnější bílý šum, protože generuje náhodný signál se stejnou amplitudou, ale rozdíl je v tom, že bílý šum má ve svém spektru všechny frekvence ze zvoleného pásma. Tento signál následně spouští vibrátor TIRA, který rozkmitá v ose y destičku s MEMS akcelerometrem. Vstupní a výstupní signály z MEMS akcelerometru vstupují do měřicí karty od společnosti NI. Tato měřicí karta je připojena k počítači přes USB rozhraní. Pomocí sériové linky navazuje komunikaci s prostředím LabVIEW. V LabVIEW je řešen program pro zobrazení dat.

Z obr. 6.1 a obr. 6.2 vidíme čtyři grafy. Na pravé straně je vykreslen první graf, kde je vykreslen vstupní signál, který vstupuje do MEMS neboli výstupní signál z analyzátoru TIRA. Spodní graf vykresluje výstupní signál z MEMS nebo signál měřený akcelerometrem. Vpravo jsou dva grafy, Nyquistovy charakteristiky a LFCH. Horní graf řeší vykreslení Nyquistových charakteristik, kde osa souřadnic je dána imaginární osou vůči reálné ose. Pomocí Nyquistovy charakteristiky zjistíme, jestli obklopuje kritický

bod -1. Podle toho se dozvíme, jestli regulační obvod je stabilní nebo nestabilní, jestli je kmitavá mez stability nebo není. Určíme z Nyquistovy charakteristiky, kolika kvadranty průběh prochází, tím určíme setrvačnost řádu. Podle charakteristiky zjistíme, jestli se jedná o proporcionální, integrační nebo derivační člen. Proporcionální člen začíná na kladné reálné poloose, derivační člen začíná v nule a integrační člen začíná v nekonečnu. Spodní graf vykresluje LFCH. Počátek LFCH určuje, o jaký typ systému se jedná, proporcionální člen začíná na konstantní hodnotě, derivační člen roste, integrační člen klesá. Dalším způsobem dokážeme určit setrvačnost členu po aproximované původní LFCH. Tyto charakteristiky jsou vhodné, protože snadno určíme velikost amplitudu v decibelech závislé na frekvenci. Vhodné je, že můžeme snadno využít aproximaci signálu. Díky aproximaci budeme moci seřídít regulátor pomocí konstanty zesílení a časových hodnot s určitou chybou přesností.

Z obr. 6.1 určíme pomocí Nyquistovy charakteristiky a LFCH, že se jedná o proporcionální člen se setrvačností třetího řádu. Podle LFCH vidíme, že charakteristika po 1 kHz snaží držet konstantní průběh a potom od frekvence 1kHz se LFCH rychle utlumí. Podle Nyquistovy charakteristiky ještě dokážeme určit, že obvod je stabilní, protože FCH protíná reálnou osu až za hodnotou -1. Na obr. 6.2 je stejný postup jako podle obr. 6.1. Rozdíl mezi nimi je ten, že na obr. 6.2 je vykreslen derivační člen se setrvačností třetího řádu. Dalším rozdílem je, že tento člen se snaží rychle zesílit daný obvod a následně udržet hodnotu konstantní. Zbývající vlastnosti tohoto členu jsou stejné jako u obr. 6.1.

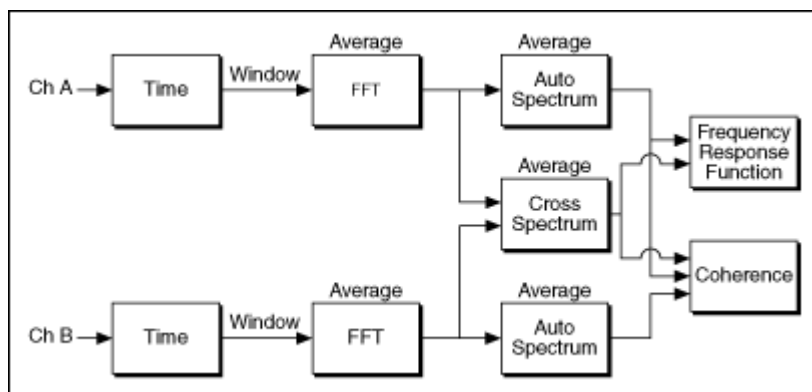
V blokovém diagramu je znázorněn program pro měření a ukládání dat. První části řešení je popsán Vstup MEMS. Druhou částí je popsán blokem Výstup MEMS. Tyto dva bloky pro vytvoření kanálu s časovým základnou. Následný funkční blok řeší spouštění tasků neboli vstupních kanálů z měřicí karty. Za spuštěním je čtení jednotlivých kanálů a následné uzavření těchto kanálů. V programu je použita smyčka *While*, která slouží pro opakované měření. Pravou částí programu nám řeší softwarový výpočet, kde funkční blok Frequency Response Function (FRF) tvoří jednotlivé výpočty ze vstupních signálu a následné řešení je přepočteno na logaritmické souřadnice. Struktura Case nám v tomto VI řeší ukládání dat pro další zpracování. Tento celý popis je znázorněn na obr. 6.3.



Obr. 6.3 Program pro měření charakteristik a vykreslení charakteristik po přepočtení vstupních signálů

Nejdůležitější částí tohoto programu je použití funkční blok FRF. Tento funkční blok má v sobě zabudovaný výpočet frekvenčního přenosu a následně vykreslí Nyquistovu charakteristiku a LFCH. Podrobné složení tohoto funkčního bloku je reprezentována složením několika VI, kde složení jednotlivých vstupních signálů jsou složitým způsobem přepočteny na jednotlivé funkce, které jsou potom poupraveny na vykreslení charakteristik.

Na obr. 6.4 je zobrazené vnitřní propojení funkčních bloků FRF, která přepočítává jednotlivé signály.



Obr. 6.4 Schéma funkce FRF [National Instrument, 2010]

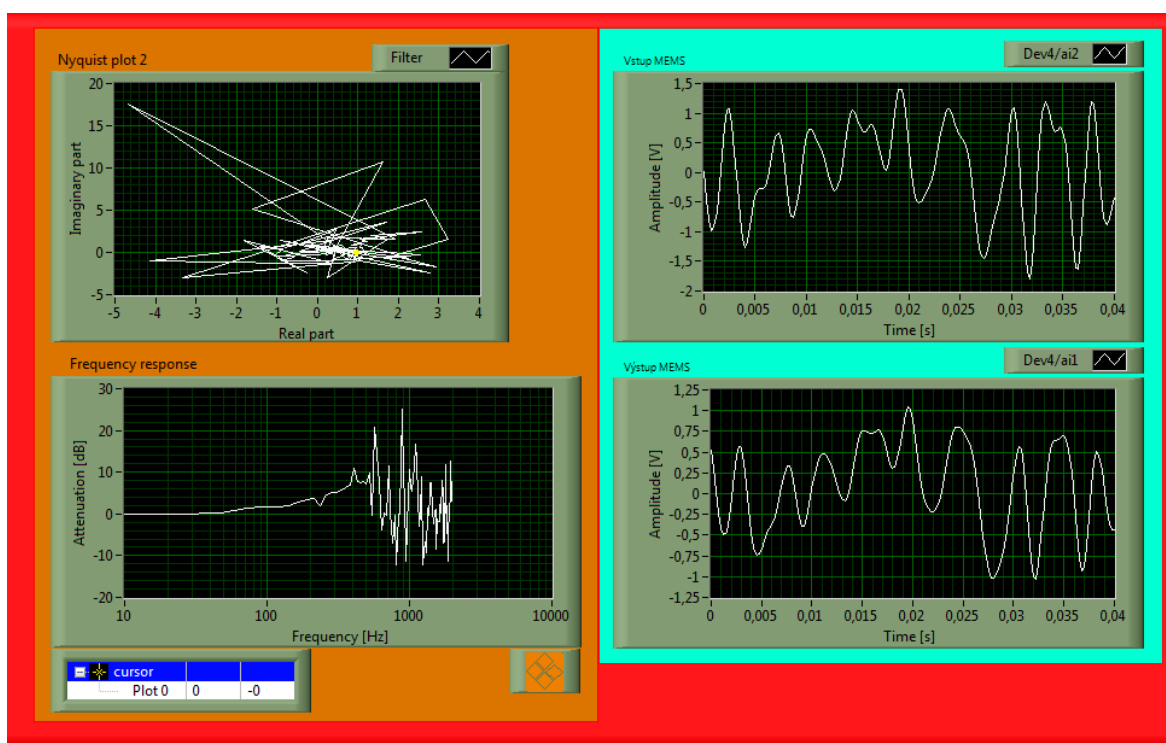
Analýza dvou kanálů je současně vzorkována. Jak můžeme vidět z obrázku, je okamžité spektrum, které vypočítá pomocí funkčního okna a Fast Fourier Transform (FFT) pro jednotlivé kanály. Průměrné FFT spektrum je automaticky výkonové spektrum a křížové výkonové spektrum. Tyto spektra jsou počítány a používány k odhadu frekvenčního přenosu. Frekvenční přenos systému můžeme popsat s ohledem na rozsah, fázi pro každé frekvence. Zisk systému je stejný jako velikost a rozměr výstupního rozsahu při každého vstupu frekvence. Fázi systému určí rozdílem mezi výstupní fází a vstupní fází pro každou frekvenci.

Tento funkční blok počítá frekvenční odezvu a soudržnost na vstupních signálech. Výsledkem jsou vrácená reálné a imaginární části a jejich soudržnost. Podrobné propojení jednotlivých vstupů a výstupu jsou popsány v nápovědě při spuštění programu a nalezení tohoto funkčního bloku.

Další části této kapitoly bude zaměřeno na vyhodnocení charakteristik z měření. Během měření frekvenčních charakteristik se mi měnily použité přístroje za jiné. Příkladem je použití místo generování obvodu zvukovou kartou jsem musel použít pulzní generátor, protože zvuková karta dokázala generovat signál v rozsahu plus mínus jeden volt a já jsem musel použít pulzní generátor, který generuje amplitudu mnohem větší než zvuková karta. Pro měření jsem použil i akcelerometr Brüel&Kjær z důvodu ověření správnosti naměřených výsledků. Důvod proč jsem ho použil je, že je přesnější a má v sobě zabudovaný digitální display, pomocí kterého jsem nastavil údaje a pokusil se měřit. Podle výsledků jsem byl schopen usoudit, že není něco v pořádku. Nejjednodušším způsobem, jak zjistit chybu bylo využití RC členu (RC filtru). Důvodem použití RC členu je, že vím odhadem, jak mají vypadat FCH. Po zjištění chyby při měření jsem musel provést úpravy programu pro měření. V průběhu úprav jsem se snažil odstranit rušení, který mi vznikl průběhu měření. Příkladem je odebrání zdroje pro napájení MEMS a nahradit baterkou, protože baterka není připojena do sítě a proto nemůže vznikat na vedení rušení. Postupnými úpravami pro snížení rušení jsem mohl provádět měření. Celkové rušení nebylo schopno odstranit z důvodu připojení jednotlivých přístrojů pro generování signálu.

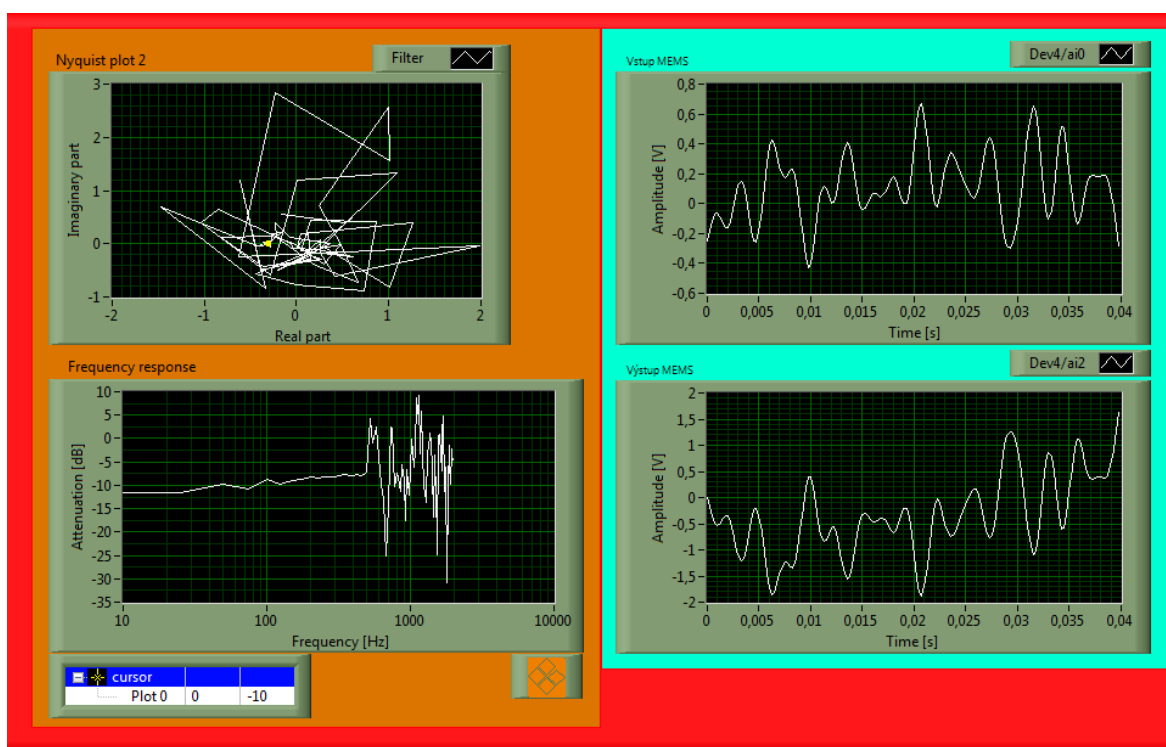
Výsledky měření, které jsem prováděl v programu LabVIEW jsou znázorněny v následujících třech obrázcích, podle kterých dokážu vykreslit a následně posoudit LFCH. Na obrázcích jsou vykresleny výsledky FCH z RC členu, akcelerometru Brüel & Kjær a MEMS akcelerometru. Na obr. 6.5 jsou vykresleny signály, pomocí nichž dokážu vykreslit FCH RC členu na první pohled můžeme vidět, že generovaný signál je ve tvaru

bílého šumu a jeho odezva je také bílý šum, který je fázově posunut. Na levé části můžeme vidět vykreslení LFCH a Nyquistovy charakteristiky. Z vykreslených průběhů dokážeme určit jenom, že se jedná o proporcionální systém, protože LFCH začíná konstantní hodnotou. Dále zjistíme, že se v systému objevuje překmit. Více vlastností systému nejde jednoznačně určit. Podle znalostí teorie vím, že pro RC člen je setrvačnost prvního řádu. Z LCH se dozvíme, že systém je kolem 800 Hz zašuměn. Z Nyquistovy charakteristiky nedokážeme na první pohled určit další vlastnosti, protože kdybychom potřebovali jednoznačně určit průběh systému a typ systému musely by se signály jiným způsobem vzorkovat. Pro lepší záznam bychom potřebovaly na začátku častěji vzorkovat a na konci charakteristiky zase méně, protože konec Nyquistovy charakteristiky je zašuměn. Změnu vzorkovací frekvence nelze provést, protože multifunkční karta USB 6008 od společnosti NI dokáže jenom vzorkovat signál se stejnou dobou vzorkovací frekvence, kterou si nastavuje uživatel v programu, proto nelze nastavit vzorkování ze začátku častěji a na konci pomaleji. Multifunkční karta USB 6008 slouží pouze pro jednoduché měření signálu. Kdybychom potřebovaly měnit vzorkování na signál, musely bychom použít dražší kartu, která by dokázala přesně zaznamenat údaje hodnot. Nevýhodou této karty je, že dokáže malý rozsah vzorkování a jeho velikost vzorkování se snižuje s počtem připojených vstupních kanálů pro měření. Další chybou měření je, že pulzní generátor generuje bílý šum, tak ve skutečnosti se nejedná o bílý šum, protože amplituda průběhu se mění a přitom by měla být konstantní s jinou frekvencí. Tato chyba generátoru nám zapříčiňuje další chybu při měření. V průběhu měření se mi objevovalo rušení ze sítě, které jsem musel snížit. Při měření se objevovaly i jiné chyby, se kterými bychom mněli, potom počítat. Průběhy byly moc zkreslené. Největší problém bylo, že se mi v měření objevovalo rušení, které mi vykreslovalo nepěkné průběhy.



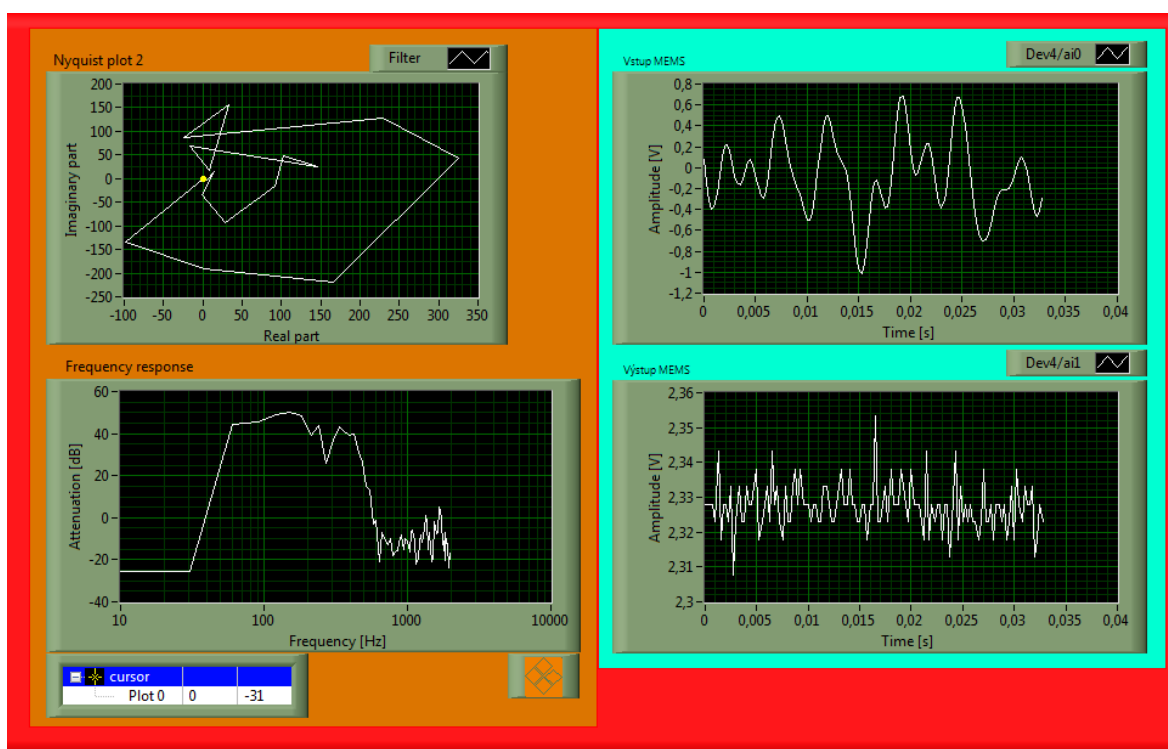
Obr. 6.5 Vypočtené a vykreslené charakteristiky RC filtru, generovaný bílým šumem.

Na obr. 6.6 je vykreslení LFCH a signály měřené na vstupu a výstupu akcelerometru Brüel&Kjær. U tohoto akcelerometru se objevovaly podobné chyby jako v předchozí kapitole, a které budou i vznikat při měření MEMS akcelerometru. Tento typ akcelerometru dává lepší výsledky než MEMS akcelerometr. Hlavní rozdíl mezi těmito akcelerometry je jejich cena, kde MEMS akcelerometr je, více levnější, než akcelerometr Brüel&Kjær, který má v sobě zabudovaný filtr pro vyfiltrování šumu. Umožňuje různé nastavení zrychlení pro měření což je největší výhodou tohoto akcelerometru.



Obr. 6.6 Vypočtené a vykreslené charakteristiky akcelerometru Brüel&Kjær generovaný bílým šumem.

Z vykreslených LFCH určíme pro akcelerometr Brüel&Kjær, že je to proporcionální člen. Nedokážeme z vykreslených charakteristik určit další vlastnosti systému. Vykreslení MEMS akcelerometrů je zobrazen na obr. 6.7. Z těchto charakteristik také dokážeme určit, o jaký systém se jedná, ale nedokážeme zjistit další vlastnosti k tomuto systému. Z LFCH jsem se dozvěděl, že MEMS akcelerometr je také proporcionální člen.

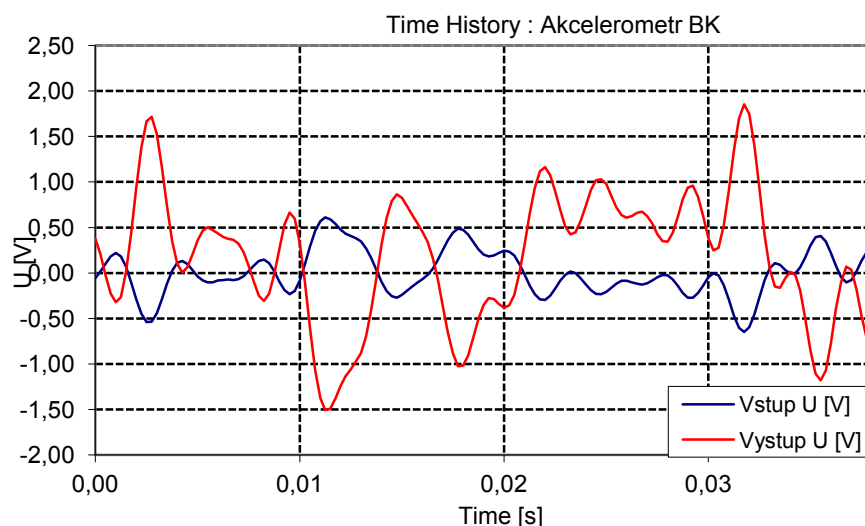


Obr. 6.7 Vypočtené a vykreslené charakteristiky MEMS akcelerometru generovaný bílým šumem.

Porovnání obou akcelerometrů můžeme určit na první pohled. MEMS akcelerometr je posunut o napětí daný výrobcem při zapojení akcelerometru k napájení a toto napětí nelze snížit jenom pouze programově, kdež to akcelerometr Brüel&Kjær dokážeme manuální nastavení napětí při určitém gravitačním zrychlení. Akcelerometr Brüel&Kjær je přesnější pro měření než MEMS akcelerometr. Vidíme jednoznačné rozdíly mezi akcelerometry na obrázcích při vykreslení LFCH a Nyquistovy charakteristiky.

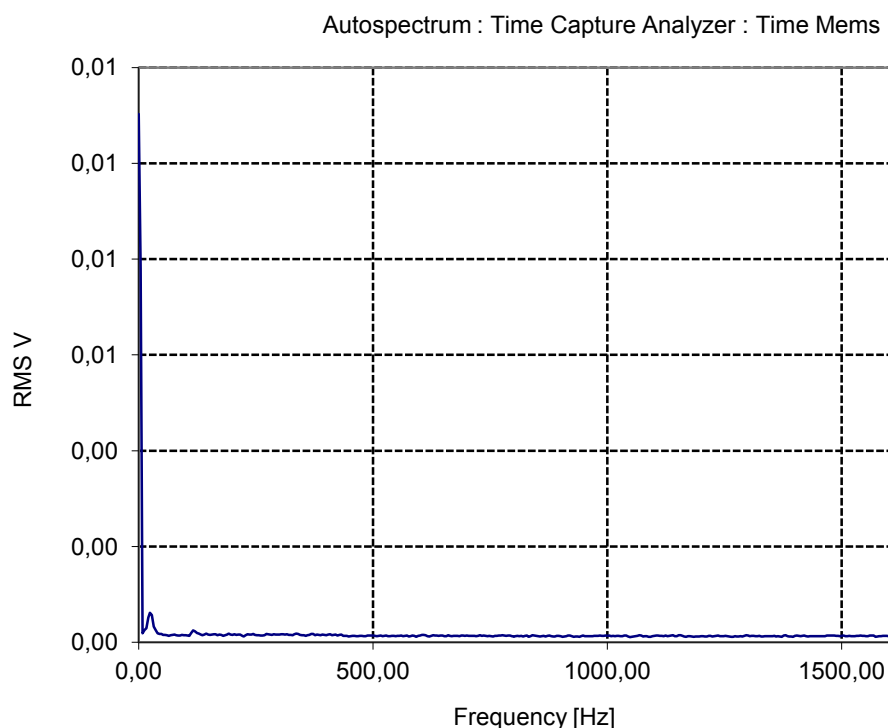
Další částí vyhodnocení FCH je pomocí Signal Analyzer, kde pomocí změřených hodnot dokážeme vykreslit charakteristiky. Než se dostanu, k popisům jednotlivých charakteristik musím říci, že systémy jsou stejné jako při vykreslení v programu LabVIEW. Vlastnosti systému nedokážeme ani v tomto programu jednoznačně říci.

Na obr. 6.8 jsou vykresleny vstupní a výstupní signály akcelerometru, které odpovídají změřených hodnot. Vstupní signál vstupuje do vibrátoru TIRA a výstupní signál je měřený akcelerometrem Brüel&Kjær. Na obrázku vidíme, že výstupní amplituda je dvakrát až třikrát větší a je fázově posunutý o určitý úhel. Výstup je větší z toho důvodů, protože vibrátor TIRA, který je zvětšen z důvodů větších vibrací na vibrátoru TIRA.



Obr. 6.8 Vykreslení vstupní a výstupní průběh akcelerometru Brüel&Kjaer generovaný bílým šumem.

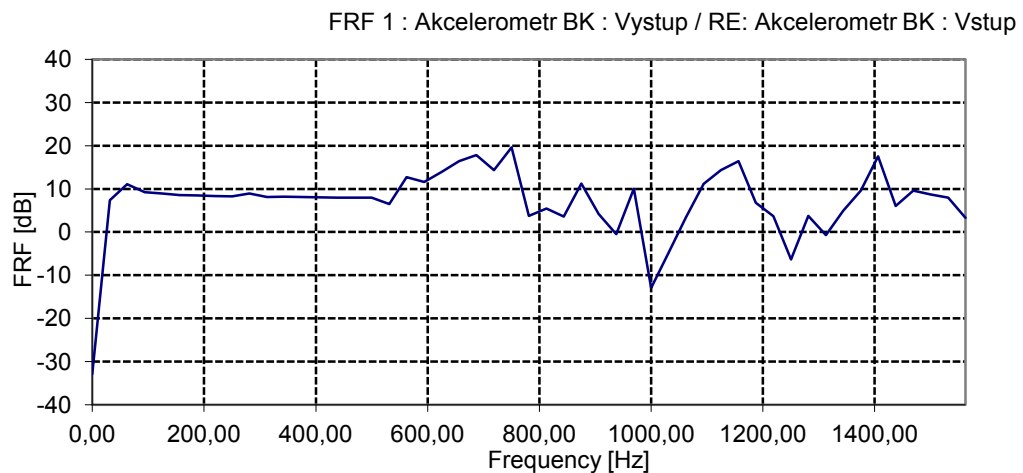
Na obr. 6.9 je vykreslený příklad autospektra pro MEMS akcelerometr, kde pomocí autospektra určíme amplitudu a fázi při generované frekvenci. Pomocí amplitudy a fáze dokážeme určit reálnou a imaginární část, které slouží pro vykreslení FCH.



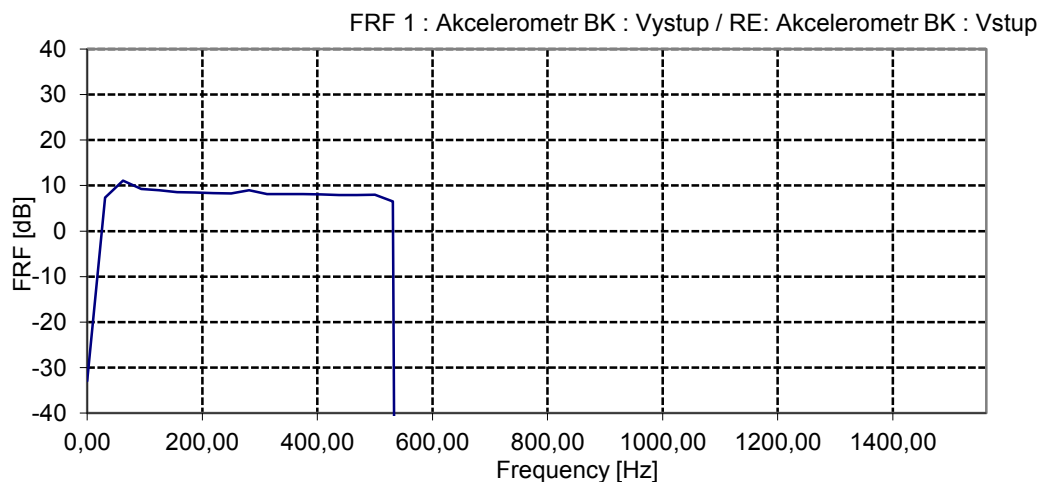
Obr. 6.9 Příklad vykreslení autospektra měřený pulzním generátorem a měřený MEMS akcelerometrem.

Poslední tři příklady vykresleny v Signal Analyser jsou obrázky, které vykreslují LFCH a Nyquistovu charakteristiku. Na obr. 6.10 je vykreslení LFCH a na obr. 6.11 je

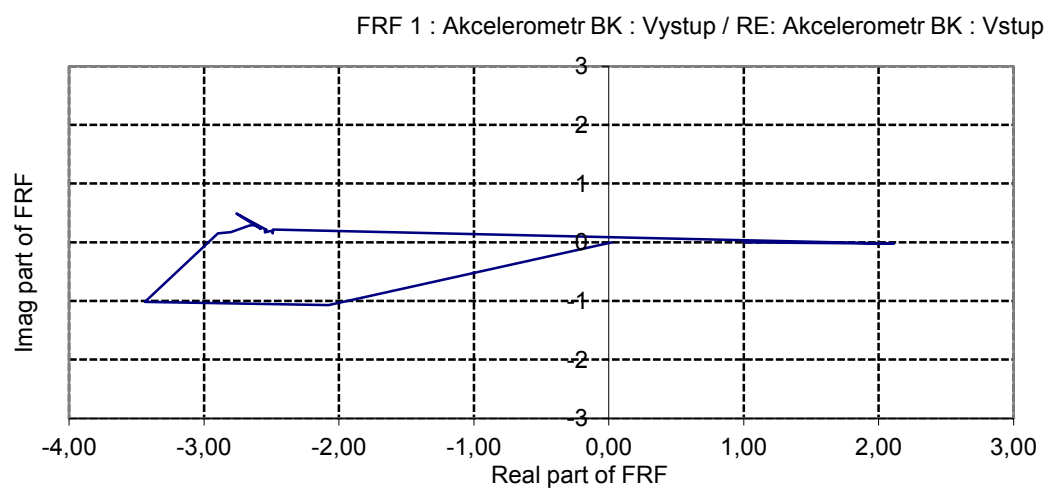
vykreslení LFCH upravena pomocí filtru. Pomocí LFCH určím vlastnosti členu, který je popsán u vykreslení LFCH v programu LabVIEW. Podle vykreslených charakteristik jsem se dozvěděl, že program LabVIEW a Signal Analyser vykreslují podobné charakteristiky. Podle LFCH nebo FCH jsem zjistil, že vlastnosti systému jsou stejné, protože LFCH a FCH bez filtru jsou totožné.



Obr. 6.10 Příklad vykreslení frekvenční charakteristiky akcelerometrem Brüel&Kjaer.



Obr. 6.11 Příklad vykreslení filtrované frekvenční charakteristiky akcelerometrem Brüel&Kaer.



Obr. 6.12 Příklad vykreslení Nyquistovy charakteristiky akcelerometrem Brüel&Kjaer.

7 Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval měření frekvenčních charakteristik. Využil jsem frekvenční charakteristiky k tomu, abych dokázal vyhodnotit chování systému. Zabýval jsem se s výpočtem frekvenčních charakteristik. Výpočtem jsem byl schopen určit vstupní a výstupní signál systému. Z těchto určených signálů jsem si dokázal vypočítat frekvenční přenos, který jsem použil pro vykreslení frekvenčních charakteristik. Frekvenční charakteristiky dokážeme vykreslit dvěma způsoby a to amplitudo-fázovou a amplitudovou frekvenční charakteristiku a fázovou frekvenční charakteristiku. Z vykreslených charakteristik dokážu vyhodnotit frekvenční charakteristiky.

Seznámil jsem se s MEMS snímači na jakém principu pracují a s jakou technologií jsou vyráběny. Mezi MEMS snímači patří akcelerometry a gyroskopy. Postupným studiem jsem se dozvěděl principy činnosti, jak akcelerometru, tak gyroskopu. V bakalářské práci je popsán způsob vyhodnocení zrychlení akcelerometru a příklad propojení akcelerometru s mikrokontrolérem. Popsal jsem typ akcelerometru, na kterém budu provádět měření. Pro měření byl použit akcelerometr ADXL001, jednalo se o jednoosý akcelerometr. Pomocí datasheetu jsem se dozvěděl jednotlivé parametry, které nesmí být překročeny během měření a jak se chová akcelerometr při daných napětí daný výrobcem. Dalším bodem jsou MEMS gyroskopy. Gyroskopy jsou vyráběny různou technologií a díky této technologii pracují na jiném principu. Pro výpočet vlastností rotačního gyroskopu jsem použil základní matematické popisy pro určení fyzikálních vlastností. Pro měření bude použit gyroskop ADXRS450. O tomto gyroskopu jsem se dozvěděl princip jeho chování a základní parametry, které musím dodržet průběhu měření.

Pro měření frekvenčních charakteristik MEMS akcelerometru a gyroskopu jsem použil program LabVIEW. Při spuštění programu se mi otevřou dvě okna, na kterých budu provádět přípravu pro měření frekvenčních charakteristik. Otevře se mi čelní panel a blokový diagram. Obě okna mají v sobě několik knihoven pro realizaci měření, generování a podobně. V programu jsem si prostudoval jednotlivé funkční bloky, které jsem následně použil pro svoji aplikaci programu. Pro práci použiji multifunkční kartu USB6008 od společnosti National Instrument. Pomocí této karty dokážeme navázat komunikaci s reálným zařízením. Dále jsem popsal vybrané aplikace pro danou měřicí kartu.

Po důkladném seznámení programu LabVIEW jsem si navrhl experiment pro měření frekvenčních charakteristik. Návrh experimentu je tvořen z bloků pro měření MEMS akcelerometru. Při návrhu jsem se okrajově seznámil s jednotlivými přípravky pro měření. Z funkčních bloků jsem provedl praktickou realizaci. Zabýval jsem se návrhem programu Signal Analyser, pomocí kterého jsem byl schopen generovat signál ze zvukové karty do vibrátoru TIRA. Vibrátor TIRA začal vytvářet vibrace, které akcelerometr zaznamenával údaje a posílal změřené údaje do počítače pro další zpracování.

Poslední částí bakalářské práce je vyhodnocení frekvenční charakteristiky. Než jsem začal vyhodnocovat frekvenční charakteristiky, navrhl jsem si program pro měření frekvenčních charakteristik v programu LabVIEW, který dokázal zaznamenávat vstupní a výstupní signály. Tyto signály byly použity pro další zpracování a vykreslení frekvenčních charakteristik. Když výsledky nebyly správné ani při úpravách programu musel jsem se ještě jednou seznámit s programem Signal Analyser, který také má v sobě výpočet frekvenčního přenosu pro určení frekvenčních charakteristik. Po vykreslení charakteristik jsem se dozvěděl, že výsledky jsou stejné a proto jsem vyloučil chybu v programu a řešil jsem chyby v obvodu zapojení. Zjistil jsem chybu při měření akcelerometru, kterou jsem následně pokoušel odstranit, až se mi zdály výsledky reálné, potom jsem začal měření znova s programem LabVIEW a porovnával jsem výsledky s programem Signal Analyser. Jednotlivé frekvenční charakteristiky akcelerometru jsem vyhodnotil.

Celá práce je zaměřena na vyhodnocení frekvenčních charakteristik. Díky této práci jsem se seznámil s MEMS Akcelerometrem a s frekvenčními charakteristikami. Cílem celé práce je vykreslování frekvenčních charakteristik z vypočteného přenosu. Nejtěžší částí práce bylo měření frekvenčních charakteristik, které potřebujeme pro vyhodnocení systému. Příkladem je typ systému, jaký řád setrvačnosti je systém. Další možný směr řešení dané problematiky je měření tříosého MEMS akcelerometru nebo rozšíření programu LabVIEW pro měření frekvenčních charakteristik, například o odstranění šumu během měření. Další směrem řešení může být návrh experimentu a měření frekvenčních charakteristik MEMS gyroskopu a rozšíření vytvořené aplikace pro měření MEMS gyroskopu.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce paní doc. Ing. Renatě Wagnerové Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při vypracování této bakalářské práce.

Použitá literatura

ANDRÝSEK, F., BRÝDL, Z., KOHOUT, L., ŠMEJKAL, L. & VORÁČEK, R. 2005.

Automatizace a automatizační technika II-Automatické řízení.: CP Books, a.s. Brno,

2005. 218 s. ISBN 80-251-0796-5

ANALOG DEVICES 2010. *ADXL001 Širokopásmové akcelerometry.*: Analog Devices,

2010, 16 s.[online]. [cit. 2011-12-12]. Dostupné z www: <URL:

http://www.analog.com/static/imported_files/data_sheets/ADXL001.pdf>

ANALOG DEVICES 2009. *ADXL001-70Z Širokopásmové akcelerometry.*: Analog

Devices, 2009, 2 s. [online]. Dostupné z www: <URL:

http://www.silica.com/fileadmin/02_Products/Productdetails/Analog_Devices/Silica_ADI_EVAL-ADXL001-ds.pdf>

ANALOG DEVICES 2011. *ADXRS450 Gyroskop.*: Analog Devices, 2011, 28 s.[online].

[cit. 2011-12-12]. Dostupné z www: <URL: [http://www.analog.com/static/imported-](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXRS450.pdf)

[files/data_sheets/ADXRS450.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXRS450.pdf)>

CHMELÁŘ, P. 2011. *Stabilizace polohy létajícího objektu pomocí inerciálních senzorů.*:

Diplomová práce pod vedením Ing. Pavla Rozsívál Pardubice, 2011. 79 s.

HAVLÍČEK, J., VLACH, M., VLACH, J. & VLACHOVÁ, V. 2008. *Začínáme*

s LabView.: 1. vyd. BEN-technická literatura Praha 10, 2008. 248 s. ISBN 978-80-7300-

245-9

HÁJEK, L., & HAMÁLEK, T. 2010-2011. *Gyroskopy.*: [online]. [cit. 2008-11-10].

Dostupné z www: <URL: fyzsem.fjfi.cvut.cz/2010-2011/Zima10/proc/gyroskopy.pdf>

HUSÁK, M. 2008. *Užití MEMS v průmyslu:* časopis AUTOMA [online]. [cit. 2008-11-10].

Dostupné z www: <URL: www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38277.pdf>

JURÁNEK, M. 2010. *Model s USB MEMS akcelerometry-popis:* Ostrava, Katedra ATR

VŠB-TU Ostrava, 2010. 16 s.

JURÁNEK, M. & KULHÁNEK, J. 2011. *The use MEMs accelerometers for measurement*

of driver seat comfort.: Ostrava, Katedra ATR VŠB-TU Ostrava, 4 s.

JURÁNEK, M. & KLEČKA, R. 2009 *Testování nástrojů pro měření vibrací v automobilu.*: Ostrava, Katedra ATR VŠB-TU Ostrava, 2009. 9 s. ISBN 978-80-248-1953-2.

KULHÁNEK, J. 2009. *Measurement of 3D acceleration in car with MEMs sensors.*: Ostrava, Katedra ATR VŠB-TU Ostrava, 2009. 4 s. ISBN 978-80-248-1953-2.

KLEČKA, R., TŮMA, J. & MAHDAL, M. 2009. *Analýza měření s vibrátorem TIRA:* Ostrava, Katedra ATR VŠB-TU Ostrava 2009. 9s. ISBN 978-80-248-1953-2

NATIONAL INSTRUMENT. 2010. *Frequency Response Function.*: Praha, 2010. Číslo produktu 371361G-01. Dostupné z www:<URL: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361G-01/lvanlsconcepts/frequency_response_function/>

NATIONAL INSTRUMENT. 2012. *Low-Cost-Pawered Multifunction DAQ for USB6008/6009.*: Praha, 2012. 7 s. Dostupné z www:<URL: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-218/lang/en>>

NOSKIEVIČ, P. 1999. *Modelování a identifikace systémů.*: 1. vyd. Ostrava: Montex, a. s. Ostrava, 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2

SCHIMITZEK, A. 2011. *Integrované MEMS Akcelerometry.*: Bakalářská práce pod vedoucím práce Ing. Tomáš MARADA, PH. D. Brno, 2011. 47 s. [online]. [cit. 2008-11-10]. Dostupné z www: <URL: autnt.fme.vutbr.cz/szz/2011/BP_Schimitzek.pdf>

ŠURÁNEK, P. 2010. *Dynamické vlastnosti silentbloků.*: Bakalářská práce, Ostrava, Katedra ATR VŠB-TU Ostrava, 2010, 47 s.

TŮMA, J. 2007. *Signal Analyser-manual.*: Ostrava, Katedra ATR VŠB-TU Ostrava, 2007, 94 s.

TŮMA, J. 2008. *Signal Processing*, Ostrava, Katedra ATR VŠB-TU Ostrava, 2008, 126 s.

VÍTEČEK, A. & VÍTEČKOVÁ, M. 2008. *Základy automatické regulace.*: 1. vyd. Ostrava: Katedra ATR VŠB-TU Ostrava, 2008. 244 s. ISBN 978-80-248-1924-2

VOJÁČEK, A. 2009. *Gyroskopy v integrovaném provedení MEMS.*: [online]. [cit. 2008-11-10]. Dostupné z www: <URL: <http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>>